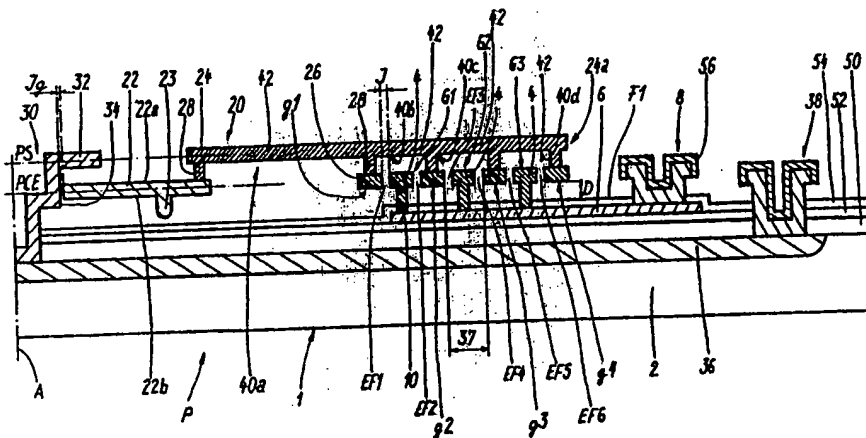


(54) Title: ELECTROSTATIC RADIAL FIELD MICROMOTOR OBTAINED BY PHOTOLITHOGRAPHIC MICROMANUFACTURE AND METHOD OF MANUFACTURE THEREOF

(54) Titre: MICROMOTEUR ELECTROSTATIQUE A CHAMP RADIAL REALISE PAR MICROFABRICATION PHOTOLITHOGRAPHIQUE ET PROCEDE DE REALISATION D'UN TEL MICROMOTEUR



The motor has a stator equipped with several groups (Gn) of electrodes angularly offset in relation to one another about an axis of rotation of said micromotor, an electrically conductive rotor of which at least one arm carries a counter-electrode capable of co-operating with the stator electrodes in order to form between the latter an air gap, and a guide ring for rotatably and possibly translationally driving the rotor. The motor is characterized in that the rotor has at least one bridge-forming element (40a-f) located, at least in part, above an electrostatic field plane (EFP) of the motor, this element constituting an elevated arm of the rotor and carrying one or several mechanically or electrically functional units (26, 151, 161) capable of co-operating with one or several complementary units (4, 152, 162) located within or outside the electrostatic field plane and within or outside the group of electrodes of the stator. The micromotor may be used for stepping, continuous rotation or bi-directional rotation drive of an extremely miniaturized mechanism.

BEST AVAILABLE COPY

(57) Abrégé L'invention concerne un micromoteur électrostatique à champ radial, réalisé par microfabrication photolithographique. Ce moteur comporte un stator pourvu de plusieurs groupes (G_n) d'électrodes angulairement décalées les unes par rapport aux autres autour d'un axe de rotation du micromoteur, un rotor électriquement conducteur dont au moins un bras porte une contre-électrode apte à venir coopérer avec les électrodes du stator pour former entre celle-ci un entrefer, et une bague de guidage destinée à entraîner en rotation et éventuellement en translation le rotor, ce micromoteur étant caractérisé en ce que le rotor comporte au moins un élément formant pont (40a-f) qui est disposé au moins en partie au-dessus d'un plan de champ électrostatique (PCE) du micromoteur, cet élément qui constitue un bras surélevé du rotor portant un ou plusieurs organes mécaniquement ou électriquement fonctionnels (26, 151, 161) aptes à coopérer avec un ou plusieurs organes complémentaires (4, 152, 162) situés dans ou en dehors du plan de champ électrostatique et à l'intérieur ou à l'extérieur du groupe d'électrodes du stator. Ce micromoteur s'applique à l'entraînement pas à pas, en rotation continue ou en rotation bidirectionnelle d'un mécanisme extrêmement miniaturisé.

UNIQUEMENT A TITRE D'INFORMATION

Codes utilisés pour identifier les Etats parties au PCT, sur les pages de couverture des brochures publiant des demandes internationales en vertu du PCT.

AT	Autriche	FI	Finlande	ML	Mali
AU	Australie	FR	France	MN	Mongolie
BB	Barbade	GA	Gabon	MR	Mauritanie
BE	Belgique	GB	Royaume-Uni	MW	Malawi
BF	Burkina Faso	GN	Guinée	NL	Pays-Bas
BG	Bulgarie	GR	Grèce	NO	Norvège
BJ	Bénin	HU	Hongrie	PL	Pologne
BR	Brésil	IT	Italie	RO	Roumanie
CA	Canada	JP	Japon	SD	Soudan
CF	République Centrafricaine	KP	République populaire démocratique de Corée	SE	Suède
CG	Congo	KR	République de Corée	SN	Sénégal
CH	Suisse	LI	Liechtenstein	SU	Union soviétique
CI	Côte d'Ivoire	LK	Sri Lanka	TD	Tchad
CM	Cameroon	LU	Luxembourg	TG	Togo
DE	Allemagne	MC	Monaco	US	Etats-Unis d'Amérique
DK	Danemark	MG	Madagascar		
ES	Espagne				

MICROMOTEUR ELECTROSTATIQUE A CHAMP RADIAL
REALISE PAR MICROFABRICATION PHOTOLITHOGRAPHIQUE
ET PROCEDE DE REALISATION D'UN TEL MICROMOTEUR

L'invention concerne un micromoteur électrostatique à champ radial, réalisé par une technique de microfabrication photolithographique.

5 Ce type de moteur est appelé micromoteur à cause des dimensions très faibles de certains de ses composants, qui avoisinent le micron ($1 \cdot 10^{-6}$ mètre).

10 La technique de fabrication de ce micromoteur est semblable à celle utilisée dans la réalisation des circuits électroniques intégrés. Cette technique consiste à former par des dépôts chimiques en phase vapeur différentes couches que l'on structure ensuite par l'intermédiaire de masques de forme appropriée, associés à des attaques chimiques ou au plasma.

15 Ces micromoteurs, grâce à leurs dimensions, peuvent être utilisés dans des applications très diverses où des transducteurs de force commandés par un signal électrique doivent être extrêmement miniaturisés. Parmi ces nombreuses applications, on compte notamment : l'horlogerie, la robotique, l'informatique, l'appareillage électronique de reproduction du son et de l'image, l'aéronautique et l'aérospatial, mais aussi l'ingénierie biomédicale.

20 Un moteur de ce type est décrit dans la publication du compte rendu de la conférence IEEE du groupe "Micro Electro Mechanical Systems" qui s'est tenue du 20 au 22 février 1989 à Salt Lake City, USA. Ce moteur comporte, d'une part, un stator pourvu de plusieurs électrodes angulairement décalées autour d'un axe de rotation du micromoteur, et d'autre part, un rotor électriquement conducteur
25 comprenant quatre bras dont une extrémité qui forme contre-électrode est apte à venir évoluer en regard de chaque électrode du stator.

30 Les électrodes du stator qui sont réalisées en polysilicium sont structurées sur une pastille formée d'un substrat revêtu de couches diélectriques, et elles sont connectées électriquement à un circuit de commande.

Le rotor qui est aussi réalisé en polysilicium comporte une partie de guidage à partir de laquelle s'étendent quatre bras. A l'extrémité de chaque bras est formée l'une des contre-électrodes. La partie de guidage, les bras et les contre-électrodes sont réalisés dans un même plan médian qui est perpendiculaire à l'axe de rotation du rotor et qui coïncide avec le plan médian des électrodes du stator. Ce plan forme donc un plan de champ électrostatique dans lequel pivote le rotor qui, à cet effet, est engagé avec un léger jeu radial par l'intermédiaire de sa partie de guidage, sur une bague centrale formant palier réalisée de même en polysilicium et susceptible d'être alimentée électriquement par un plan de masse ménagé entre cette bague et l'une des couches isolantes du substrat.

Le problème essentiel que l'on rencontre avec ce type de micromoteur est le niveau du couple moteur fourni ou couple utile qui est insuffisant.

De plus, ce micromoteur ne comporte aucun agencement lui permettant d'entraîner un mécanisme, c'est-à-dire de transmettre ce couple.

Ainsi, la présente invention a-t-elle pour but de remédier à ces inconvénients en proposant un micromoteur électrostatique réalisé par microfabrication photolithographique comportant des moyens permettant à la fois de transmettre le couple moteur à un mécanisme extérieur et d'élever ce couple à un niveau suffisant.

A cet effet, l'invention a pour objet un micromoteur électrostatique à champ radial du type comprenant :

- un stator comportant au moins un groupe de plusieurs électrodes angulairement décalées autour d'un axe de rotation du micromoteur, ces électrodes qui sont connectées électriquement à un circuit de commande étant supportées par un substrat,
- un rotor, de préférence réalisé au moins en partie en un matériau électriquement conducteur, comportant au moins une contre-électrode apte à venir évoluer en regard de chaque électrode du stator, sensiblement dans un même plan dit plan de champ électrostatique, le jeu laissé entre ladite contre-électrode et les électrodes correspondantes formant un entrefer,
- une bague formant palier qui est susceptible d'être électriquement alimentée et qui est solidaire dudit substrat, ledit rotor

étant guidé en rotation, et éventuellement en translation, autour de cette bague par l'intermédiaire d'une partie de guidage dont est solidaire ladite contre-électrode, caractérisé en ce que ledit rotor comporte au moins un élément formant pont qui est disposé au-dessus du plan de champ électrostatique, cet élément qui constitue un bras
 5 surélevé du rotor portant un ou plusieurs organes mécaniquement ou électriquement fonctionnels, aptes à coopérer avec un ou plusieurs organes complémentaires situés dans ou en dehors du plan de champ électrostatique et à l'intérieur ou à l'extérieur dudit groupe d'électrodes du stator.

10 On comprend donc que la disposition de cet élément formant pont ménagé à un niveau supérieur par rapport aux électrodes du stator permet de disposer sur un même bras du rotor plusieurs contre-électrodes disposées en peigne et coopérant de façon interdigitée avec d'autres groupes d'électrodes ménagés sur le stator. On augmen-
 15 te ainsi le nombre d'entrefers et de façon sensiblement correspondante le couple utile. De plus, cet élément formant pont permet de prévoir sur le rotor un élément de transmission du couple constitué par un pignon ou par une roue dentée. On observera que la disposition de cet élément formant pont permet l'association des caracté-
 20 ristiques précitées, ce qui permet de répondre simultanément aux deux problèmes posés (transmission et élévation du couple), et ce sans augmenter l'épaisseur du micromoteur et à moindre coût grâce à un nombre limité d'étapes dans le procédé de fabrication photolitho-
 25 graphique.

La présente invention a aussi pour objet un procédé de réalisation photolithographique d'un moteur électrostatique, caractérisé en ce qu'il consiste :

a) - de préférence à ménager sensiblement sur toute la surface d'un substrat, une première couche électriquement conductrice destinée à alimenter une bague centrale apte à guider et à contacter une partie de guidage d'un rotor du micromoteur,

b) - à ménager au moins une première couche électriquement isolante sur cette couche conductrice,

35 c) - à structurer des pistes conductrices sur la première couche isolante, ces pistes étant destinées à alimenter des

électrodes du stator par l'intermédiaire d'un circuit de commande du micromoteur,

d) - à déposer au moins partiellement sur les couches précédentes de préférence une couche présentant une fonction protectrice et une fonction de diminution du frottement et d'isolation électrique,

5 e) - à structurer, avec interposition d'une première couche sacrificielle, au moins un groupe d'électrodes angulairement décalées autour d'un axe de rotation du micromoteur, ainsi que simultanément la partie de guidage du rotor et au moins une contre-électrode du rotor,

10 f) - à structurer au-dessus de ces électrodes et de ces contre-électrodes ainsi qu'au-dessus de cette partie de guidage, avec interposition d'une deuxième couche sacrificielle, ladite bague centrale ainsi qu'au moins un élément formant pont constituant un bras surélevé du rotor destiné à être associé à au moins un organe
15 mécaniquement ou électriquement fonctionnel, tel qu'un pignon ou une roue,

g) - puis à éliminer par attaque chimique les couches sacrificielles.

20 Mais d'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront à la lecture de la description détaillée qui suit, faite en référence aux dessins annexés qui sont donnés uniquement à titre d'exemple, et dans lesquels :

- la figure 1 est une vue de dessus d'un premier mode de réalisation du micromoteur selon l'invention équipé de bornes
25 d'alimentation;

- la figure 2 est une demi-vue en section faite selon la ligne II-II de la figure 1;

- la figure 3 est une vue de dessus partielle d'un deuxième mode de réalisation du micromoteur selon l'invention;

30 - la figure 4 est une vue de dessus du micromoteur selon l'invention, suivant un troisième mode de réalisation;

- la figure 5 est une demi-vue en section faite suivant la ligne V-V de la figure 4;

35 - les figures 6 et 7 sont respectivement des demi-vues en section d'un quatrième et d'un cinquième mode de réalisation de l'invention;

- la figure 8 est une vue de dessus d'un sixième mode de réalisation du micromoteur selon l'invention;

- la figure 9 est une demi-vue en section faite suivant la ligne IX-IX de la figure 8;

5 - les figures 10, 11 et 12 sont respectivement des demi-vues en section d'un septième, d'un huitième et d'un neuvième mode de réalisation de l'invention;

- la figure 13 est une demi-vue en section d'un dixième mode de réalisation de l'invention, faite suivant la ligne XIII-XIII de la figure 14;

10 - la figure 14 est une vue de dessus partiellement arrachée du mode de réalisation de la figure 13;

- la figure 14a est une vue agrandie d'un élément formant pont et d'un pignon de la figure 14;

15 - la figure 15 est une vue de dessus d'un onzième mode de réalisation du micromoteur selon l'invention;

- la figure 15a est une vue en section partielle faite selon la ligne XV-XV A de la figure 15; et

20 - les figures 16 à 46 représentent des demi-vues en section des étapes du procédé de réalisation du micromoteur selon l'invention.

25 En se référant tout d'abord aux figures 1 et 2, on décrira un premier mode de réalisation du micromoteur électrostatique selon l'invention. Ce micromoteur électrostatique à champ radial comporte un stator 1 qui est pourvu de plusieurs électrodes 4 supportées par un substrat plan 2 de forme sensiblement rectangulaire.

30 On définira ci-après comme un "groupe" d'électrodes G_n plusieurs électrodes 4 disposées sensiblement sur une même circonférence, tandis qu'on définira comme un "ensemble" d'électrodes E_n , plusieurs électrodes voisines disposées sur des circonférences différentes.

Chaque groupe d'électrodes G_1 , G_2 et G_3 comporte plusieurs électrodes 4 en forme de secteur circulaire qui sont ménagées les unes à côtés des autres de façon concentrique sensiblement à une même distance d'un axe de rotation A du rotor.

35 Ainsi, chaque groupe d'électrodes G_1 , G_2 et G_3 présente la forme d'un anneau discontinu convenablement divisé pour que chaque

électrode 4 constitue un élément unitaire, électriquement indépendant de ses voisins du même groupe.

En se référant plus particulièrement à la figure 1, on remarque-
ra que les trois groupes d'électrodes G1, G2, et G3 sont disposés de
façon coaxiale, leur axe commun étant confondu avec l'axe de rota-
tion A du micromoteur. On observera aussi que ce moteur comporte
plusieurs ensembles d'électrodes E1 à E6, formés par des électrodes
voisines mais qui appartiennent à des groupes différents et qui sont
ménagées en regard les unes des autres et en coïncidence, dans un
même secteur géométrique du stator.

Plus particulièrement, le micromoteur représenté sur la figure 1
comporte trois groupes d'électrodes G1, G2 et G3 tandis qu'il
comporte six ensembles d'électrodes respectivement E1 à E6.

Toutes les électrodes 4 au sein d'un même ensemble E_n sont
reliées entre elles électriquement par une piste d'alimentation
commune 6 qui est reliée à une borne d'alimentation 8 susceptible
d'être connectée à un circuit électronique de commande, non repré-
senté.

Les pistes d'alimentation 6 comportent deux parties caractéris-
tiques 6a et 6b, la partie 6a sur laquelle repose la borne d'alimen-
tation correspondante 8 ayant en plan une forme sensiblement rectan-
gulaire, tandis que la partie 6b, qui permet la liaison entre les
électrodes 4 et la partie 6a, présente une forme de segment d'une
largeur beaucoup plus petite que celle de la partie 6a.

A cet effet, on remarque que la largeur de la partie 6b directe-
ment placée sous les ensembles d'électrodes E1 à E6 est beaucoup
plus petite que la longueur d'arc de chaque électrode 4.

Les électrodes 4 sont reliées au segment 6b de leur piste
d'alimentation 6 par l'intermédiaire d'un support 10 en forme de
secteur circulaire s'élevant dans une direction normale au substrat
2. Ce support 10 présente une largeur et une longueur d'arc infé-
rieures à l'électrode 4 qu'il soutient, les couples supports 10 -
électrodes 4 ainsi que le segment 6b de la piste d'alimentation
correspondante 6 étant sensiblement centrés sur un même rayon du
rotor. Les supports 10 d'un même ensemble d'électrodes E_n sont ainsi
disposés sur un même secteur géométrique.

Le moteur représenté aux figures 1 et 2 comporte de plus un rotor 20 qui est constitué d'une partie de guidage 22 formant moyeu qui a sensiblement la forme d'un disque annulaire à partir duquel s'étendent, de façon coplanaire et vers l'extérieur de l'axe de rotation A, quatre bras 24 décalés angulairement l'un de l'autre d'un angle de 90°. Chaque bras 24 comporte au voisinage de son extrémité libre 24a un certain nombre de contre-électrodes 26 ayant une configuration identique à celle des électrodes 4, à savoir en secteur circulaire.

Ces contre-électrodes 26 sont aussi disposées en "groupes" et en "ensembles" comme définis ci-dessus. Dès lors, chaque groupe g1 à g4 comprend plusieurs contre-électrodes 26 disposées sur une même circonférence mais décalées angulairement les unes des autres, tandis que les ensembles e1 à e4 comportent respectivement les contre-électrodes 26 ménagées à l'intérieur d'un même secteur géométrique, c'est-à-dire les contre-électrodes 26 de groupes différents qui sont sensiblement centrées sur un même rayon et qui sont donc disposées les unes en regard des autres, sensiblement en coïncidence.

On remarquera donc que ce rotor comporte, dans ce mode de réalisation, quatre groupes g1 à g4 et quatre ensembles e1 à e4 de contre-électrodes 26.

Le rotor 20, qui est conformé pour pouvoir tourner par rapport au stator 1, est guidé en rotation par une bague ou bouton 30 qui forme palier et dont l'extrémité libre porte un collet 32 qui emprisonne le rotor 20 en limitant le déplacement axial de la partie de guidage 22 qui est montée avec un léger jeu jj sur le pourtour cylindrique extérieur 34 de cette bague. La bague 30 est solidaire du substrat 2 et est ancrée solidement sur celui-ci. Etant réalisée en un matériau électriquement conducteur, elle peut être alimentée électriquement par l'intermédiaire d'un plan de masse 36 qui est connecté à une borne d'alimentation 38 extérieurement accessible pour être reliée au circuit électronique de commande, non représenté.

La partie de guidage 22 du rotor 20 comporte, sur sa face 22b disposée en regard du stator 1, des éléments protubérants 23 susceptibles de venir en contact sur l'une des face F1 du stator 1.

En se référant plus particulièrement à la figure 2, on remarquera que le stator 1 est constitué d'un empilement de plusieurs couches, dites couches minces, qui sont soit conductrices, soit isolantes, ces couches ainsi que tous les autres éléments constitutifs du micromoteur étant réalisés par un procédé de microfabrication photolithographique dit micro-usinage de surface dont on expliquera ci-après les étapes de façon plus détaillée. Ainsi, ce stator 1 peut être défini comme une pastille (puisque ses dimensions sont extrêmement faibles) stratifiée dans son épaisseur. Ses dimensions sont environ $1 \cdot 10^{-3}$ mètre (1mm) de côté et $0,4 \cdot 10^{-3}$ mètre (0,4 mm) d'épaisseur. Les électrodes 4 du stator 1 étant toutes supportées par un support 10 faisant saillie de la pastille P dans une direction parallèle à l'axe de rotation A du micromoteur, ces électrodes 4 se situent toutes à une distance D de la face F1, dans un même plan appelé plan de champ électrostatique PCE.

Par ailleurs, dans ce mode de réalisation, les contre-électrodes 26 du rotor 20 sont reliées au bras 24 qui les supporte respectivement par l'intermédiaire d'une patte de liaison 28 s'étendant à partir du bras 24 correspondant vers la face F1 de la pastille P.

Les contre-électrodes 26 sont donc ménagées sur le rotor 20 de sorte qu'elles puissent venir se placer dans le plan de champ électrostatique PCE, notamment lors de l'excitation des électrodes 4 par le circuit électronique de commande du micromoteur. En observant particulièrement les figures 1 et 2, on remarquera que l'espace radial 37 qui est laissé entre deux électrodes 4 voisines d'un même ensemble E_n est tel qu'il permet de loger une contre-électrode 26 du rotor 20. De plus, grâce à la forme des électrodes 4 et des contre-électrodes 26 en segment circulaire, et à la disposition coaxiale des différents groupes d'électrodes G1 à G3 et des groupes de contre-électrodes g1 à g4, les contre-électrodes 26 du rotor 20 viennent s'engager de part et d'autre des électrodes 4 du rotor et sont aptes à venir évoluer en regard de chaque électrode 4 d'un ou de plusieurs groupes G1 à G3, pour permettre l'entraînement en rotation du rotor 20. On remarquera donc qu'on a constitué grâce à cette construction une structure en forme de peigne fin interdigitée.

Le jeu J laissé entre chaque contre-électrode 26 et les électrodes 4 en coïncidence forme un entrefer EF. On a ainsi réalisé une structure dans laquelle le nombre d'entrefers est multiplié, et cela sans augmentation de l'épaisseur du micromoteur.

5 Pour chaque bras 24, on a ménagé six entrefers EF1 à EF6, ce qui donne pour le micromoteur 4 (bras) x 6 soit 24 entrefers (seuls les six premiers étant référencés).

On a pu déterminer que l'augmentation de ce nombre d'entrefers par rapport à un moteur classique permettait, sensiblement dans les
10 mêmes proportions, l'augmentation du couple moteur transmissible.

Cette caractéristique très avantageuse de l'invention a été permise entre autres par une structure particulière du rotor 20, et notamment des bras 24.

En effet, chaque bras 24 est constitué de plusieurs éléments
15 formant pont 40 qui sont disposés au-dessus du plan de champ électrostatique PCE. Dans ce mode de réalisation, chaque bras 24 est constitué sur toute sa longueur essentiellement par quatre éléments formant pont 40a, 40b, 40c et 40d ménagés les uns dans le prolongement des autres sensiblement sur un même axe géométrique correspondant à l'un des rayons du rotor 20. Les premiers éléments 40a relient
20 la partie de guidage 22 aux contre-électrodes 26 du premier groupe de contre-électrodes g1 qui est situé à l'intérieur du cercle formé par le premier groupe d'électrodes G1. Ces premiers éléments 40a sont reliés à la périphérie de la partie de guidage 22 par l'intermédiaire de pattes de liaison 28 qui sont ancrées sur la face 22a de
25 la partie de guidage 22, opposée à la pastille P qui forme stator. L'autre extrémité de ces premiers éléments formant pont 40a supporte sous elle la contre-électrode 26 du premier groupe de contre-électrodes g1, tandis qu'elle est prolongée radialement au rotor par un deuxième élément formant pont 40b à l'extrémité duquel s'étend de
30 façon normale une autre patte de liaison 28 qui est ancrée solidement sur une des contre-électrodes 26 du deuxième groupe g2. Ainsi se succèdent sur chaque bras 24 deux autres éléments formant pont 40c et 40d qui supportent respectivement les contre-électrodes 26 des troisième et quatrième groupes de contre-électrodes g3 et g4.
35 Ainsi, les quatre bras 24 sont dans ce mode de réalisation ménagés complètement en dehors du plan de champ électrostatique PCE, en

partie dans un plan surélevé PS sensiblement parallèle à ce dernier. Le plan surélevé PS coïncide sensiblement avec le plan dans lequel est ménagé le collet 32 de la bague 30.

5 Chaque bras 24 est donc constitué de deux types d'éléments formant pont 40, le premier type 40a étant constitué d'une poutre transversale 42 qui est située dans le plan supérieur PS et aux deux extrémités de laquelle s'étendent respectivement deux pattes de liaison 28. Le deuxième type d'élément formant pont, représenté par les éléments 40b à 40d, est constitué d'une poutre 42 venant de
10 matière avec la précédente et ne comportant qu'une patte de liaison 28. Les pattes de liaison 28 de ces deux types d'éléments formant pont viennent aussi toutes de matière avec leur poutre correspondante 42, tandis qu'elles sont ancrées à l'élément sous-jacent (à la partie de guidage 22 ou à une contre-électrode 26) lors du procédé de réalisation photolithographique que l'on expliquera ci-après.
15

De préférence, les éléments formant pont 40a à 40d, la partie de guidage 22, les contre-électrodes 26, les électrodes 4 avec leur support 10, les pistes d'alimentation électrique 6, les bornes d'alimentation 8, 38 et la bague formant palier 30 sont réalisés en
20 un polycristal tel que du polysilicium. Ces éléments pourraient être réalisés dans un autre matériau conducteur ou dans un matériau métallique tel que du tungstène, du chrome, de l'aluminium ou dans un autre alliage. Le substrat 2 quant à lui est de préférence réalisé en silicium semi-conducteur mais il peut être aussi fabriqué en un autre matériau semi-conducteur cristallin tel que du quartz,
25 du diamant ou de l'arséniure de gallium.

Le plan de masse 36 qui est ménagé sensiblement sur toute la surface du substrat 2 est constitué par une partie du silicium du substrat qui est électriquement dopée. Au-dessus de ce plan de masse
30 36, sensiblement sur tout le substrat 2, est ménagée une couche 50 de dioxyde de silicium (SiO_2) formant une couche électriquement isolante, d'une part entre le rotor 20 et le substrat 2, et d'autre part, entre les électrodes 4 et le substrat 2. Au-dessus de cette couche 50 est ménagée une première couche 52 de nitrure de silicium (Si_3N_4) sur laquelle sont structurées les pistes d'alimentation électrique 6. Sur ces pistes et sur la première couche 52 est
35 déposée une deuxième couche de nitrure de silicium 54 permettant

entre autres de protéger la couche de dioxyde de silicium 50 lors des attaques chimiques, mais aussi d'empêcher le claquage électrique entre le rotor 20 et le substrat 2. Les bornes d'alimentation 8 et 38 sont par ailleurs recouvertes d'une fine couche d'aluminium 56.

5 En se référant désormais à la figure 3 qui représente un deuxième mode de réalisation du micromoteur selon l'invention, on remarquera que le rotor 60 ne comporte qu'un seul bras 24 au voisinage de l'extrémité libre duquel sont ménagées en "ensemble" quatre contre-électrodes 26. Ce rotor 60 ne comporte donc qu'un seul
10 ensemble ell de contre-électrodes 26, ce micromoteur comportant aussi plusieurs groupes et plusieurs ensembles d'électrodes 4, à savoir trois groupes G1, G2, G3 et six ensembles E1 à E6 partiellement représentés conformés comme dans le premier mode de réalisation. Si dans le premier mode de réalisation des figures 1 et 2
15 l'alimentation électrique de la bague 30 via le plan de masse 36 et la borne d'alimentation 38, est facultative, elle est toutefois indispensable dans ce deuxième mode de réalisation pour permettre le fonctionnement du micromoteur.

En se référant désormais aux figures 4 et 5, il est représenté
20 un troisième mode de réalisation du micromoteur électrostatique selon l'invention.

Le rotor 70 de ce micromoteur comporte quatre bras 74 mais il pourrait être constitué d'un bras unique, comme cela est représenté à la figure 3.

25 Le micromoteur selon ce troisième mode de réalisation ne comporte qu'un seul groupe de contre-électrodes g31 et uniquement deux groupes d'électrodes respectivement G31 et G32. Il comporte aussi six ensembles d'électrodes respectivement E31 à E36. Toutefois, le rotor 70 ne comporte pas d'ensemble caractéristique de contre-
30 électrode puisque chaque bras 74 ne comporte qu'une seule contre-électrode 26. Dans ce mode de réalisation, chaque ensemble d'électrodes E31 à E36 comporte respectivement deux électrodes 4. Les bras 74 ne sont formés respectivement que d'un seul élément formant pont 40a dont une extrémité est reliée à la partie de guidage 22 par une
35 patte de liaison 28, tandis que l'autre extrémité opposée qui est située à l'extérieur du premier groupe d'électrodes G31, entre celui-ci et le deuxième groupe G32, porte une contre-électrode 26

par l'intermédiaire d'une autre patte de liaison 28. La poutre 42 de chaque élément formant pont 40a chevauche partiellement le premier groupe d'électrode G31. Ainsi, dans ce mode de réalisation, la disposition des premier et deuxième groupes d'électrodes G31 et G32
5 disposés de façon coaxiale et entre lesquels vient évoluer la contre-électrode 26 ménagée à l'extrémité de chaque bras 74 permet d'obtenir, pour chaque bras 74, un deuxième entrefer EF32 (en plus d'un entrefer EF31) qui augmente déjà le couple mécanique transmissible du micromoteur.

10 Ainsi, dans ce mode de réalisation, sur chaque bras, pour n élément formant pont ($n = 1$ dans ce cas) associé à n contre-électrode qui coopère avec n+1 groupes d'électrodes, on obtient $2 \times n$ entrefers. Avec K bras, on obtient $2 \times n \times K$ entrefers.

Dans le quatrième mode de réalisation représenté sur la figure
15 6, le bras 84 comporte deux éléments formant pont respectivement 40a, 40b, le deuxième élément formant pont 40b étant ménagé dans le prolongement du premier 40a, comme s'il était accolé à l'élément formant pont 40a du mode de réalisation précédemment décrit. Dans ce quatrième mode de réalisation, chaque bras 84 comporte deux contre-
20 électrodes 26, si bien que ce micromoteur comporte deux groupes d'électrodes G41 et G42 associés à deux groupes de contre-électrodes g41 et g42 pour constituer, par bras 84, trois entrefers EF41 à EF43. Ainsi, dans ce mode de réalisation, chaque bras comporte n
(dans ce cas $n = 2$) éléments formant pont ménagés les uns dans le
25 prolongement des autres, associés à n contre-électrodes coopérant avec n groupes de contre-électrodes pour former $2 \times n - 1$ entrefers par bras. Pour le moteur complet, on obtient avec K bras, $K \times (2 \times n - 1)$ entrefers.

Dans le mode de réalisation de la figure 7, on a prévu trois
30 groupes d'électrodes G51 à G53 coopérant avec uniquement deux groupes de contre-électrodes g51 et g52. On a formé par bras 94 quatre entrefers EF51 à 54, donc un de plus par rapport au mode de réalisation de la figure 6. Ainsi, pour n éléments formant pont par bras 94, le micromoteur selon ce cinquième mode de réalisation
35 comporte n+1 groupes d'électrodes G51 à G53 qui forment deux à deux une zone de champ électrostatique annulaire dans laquelle se déplacent les contre-électrodes 26 de l'un des deux groupes g51 et g52.

Ainsi, on observe que dans ce mode de réalisation on a prévu par bras 94 n éléments formant pont associés à n contre-électrodes coopérant avec n+1 groupes d'électrodes pour former $2 \times n$ entrefers, pour K bras 94, on obtient $K \times 2 \times n$ entrefers.

5 Dans tous ces modes de réalisation, on a prévu pour chaque bras un ou plusieurs éléments formant pont 40a, 40b associés chacun à une seule contre-électrode 26 coopérant électrostatiquement, tantôt avec deux groupes d'électrodes entre lesquels elle évolue, tantôt avec un seul (G43) à l'extérieur duquel elle est disposée par rapport à
10 l'axe de rotation A du rotor.

Quoi qu'il en soit, on comprend que le rotor comporte au moins un élément formant pont qui est disposé au-dessus du plan de champ électrostatique PCE pour former un bras surélevé du rotor apte à chevaucher au moins un groupe d'électrodes en s'étendant au-delà de
15 celui-ci.

Dans ces modes de réalisation des figures 4 à 7, chaque élément formant pont en chevauchant un groupe d'électrodes vient amener la contre-électrode qu'il porte à l'extérieur du cercle formé par ce groupe. Ainsi, chaque élément formant pont en constituant un bras
20 surélevé est apte à porter un organe électriquement fonctionnel, à savoir une contre-électrode, susceptible de coopérer avec un ou plusieurs organes complémentaires, à savoir une ou plusieurs électrodes, situés dans le plan de champ électrostatique PCE.

En se référant désormais aux figures 8 et 9, il est représenté
25 un sixième mode de réalisation du micromoteur selon l'invention. Dans ce mode de réalisation, chaque bras 104 est constitué par une extension 105 de la partie de guidage 22, qui vient de matière avec cette dernière et qui est ménagée dans le même plan que celle-ci. A l'extrémité de cette extension 105 est ménagée une contre-électrode
30 26 venant aussi de matière avec cette extension 105 et aussi réalisée dans le même plan.

Ce bras 104 comporte un seul élément formant pont 40a dont la première extrémité est ancrée sur la contre-électrode 26 du premier groupe g61 par l'intermédiaire d'une patte de liaison 28, et dont la
35 deuxième extrémité est ancrée sur une contre-électrode supplémentaire, dite deuxième contre-électrode. Cette deuxième contre-électrode appartient à un deuxième groupe de contre-électrodes g62,

la liaison entre la poutre 42 de l'élément formant pont 40a et cette deuxième contre-électrode étant réalisée par l'intermédiaire d'une patte de liaison 28. Ces deux groupes de contre-électrodes g61 et g62 sont disposés de part et d'autre d'un seul groupe d'électrodes G61, si bien qu'on a formé deux entrefers EF61 et EF62 par bras 104. Dans ce mode de réalisation pour chaque bras 104 on a prévu n élément(s) formant pont 40a comportant respectivement n+1 contre-électrodes 26 coopérant avec n groupe(s) d'électrodes G61 pour former $2 \times n$ entrefers. Plus particulièrement pour le moteur dans son intégralité qui comporte K bras 104, pour n élément(s) formant pont, on a $K \times 2 \times n$ entrefers.

Dans un septième mode de réalisation du micromoteur selon l'invention représenté à la figure 10, on a prévu, comme dans le mode de réalisation précédent, uniquement un élément formant pont 40a par bras 114 du rotor 110. Cet élément 40a comporte deux contre-électrodes 26, disposées à chacune de ses extrémités. Ainsi, le micromoteur comporte aussi deux groupes de contre-électrodes g71 et g72, mais qui sont ici associés à deux groupes d'électrodes G71 et G72. On a formé dans ce mode de réalisation trois entrefers EF71 à EF73 par bras. Pour chaque bras du rotor, on a disposé n éléments formant pont comportant respectivement n+1 contre-électrodes coopérant avec n+1 groupes d'électrodes pour former $2 \times n+1$ entrefers. Pour le micromoteur, on obtient $K \times (2 \times n+1)$ entrefers.

Dans le mode de réalisation de la figure 11, on a prévu un deuxième élément formant pont 40b pour chaque bras 124 qui comporte à son extrémité une troisième contre-électrode 26. Ainsi, par rapport au mode de réalisation précédent, on a disposé un troisième groupe de contre-électrodes g83. Dans ce mode de réalisation pour chaque bras 124 on a prévu deux éléments formant pont 40a et 40b associés à trois contre-électrodes 26 formant sur tout le micromoteur trois groupes de contre-électrodes g81 à g83. Pour chaque bras 124, ces trois contre-électrodes 26 coopèrent avec deux groupes d'électrodes G81 et G82, ce qui forme quatre entrefers. Plus particulièrement, pour chaque bras 124, on a prévu n éléments formant pont associés à n+1 contre-électrodes coopérant avec n groupes d'électrodes ce qui forme par bras $2 \times n$ entrefers et pour le micromoteur $K \times 2 \times n$ entrefers.

Dans ce mode de réalisation on remarquera que la contre-électrode terminale du groupe g83 qui est ménagée à l'extrémité libre du deuxième élément formant pont 40b est disposée à l'extérieur du deuxième groupe d'électrodes G82.

5 Cette conception est analogue à celle du mode de réalisation des figures 8 et 9 où la contre-électrode supplémentaire du second groupe g62 est disposé à l'extérieur du groupe d'électrodes unique G61.

10 En se référant désormais à la figure 12, il est représenté un neuvième mode de réalisation du micromoteur selon l'invention. Dans ce mode de réalisation, chaque bras 134 comporte deux éléments formant pont 40a et 40b associés à trois contre-électrodes 26 qui coopèrent ici avec trois groupes d'électrodes respectivement G91, G92 et G93. Ainsi, pour chaque bras 134 on a disposé n éléments
15 formant pont qui comportent respectivement n+1 contre-électrodes coopérant avec n+1 groupes d'électrodes pour former $2 \times n+1$ entrefers. Pour le micromoteur, on obtient avec K bras 134, $K \times (2 \times n+1)$ entrefers.

20 En se référant désormais aux figures 13, 14 et 14a il est représenté un dixième mode de réalisation du micromoteur selon l'invention, dans lequel le rotor 140 comporte un pignon 151 conforme pour pouvoir s'engrener avec une roue 152 d'un mécanisme à entraîner, non représenté. Le pignon 151 est rendu solidaire de la partie de guidage 22 du rotor 150 par l'intermédiaire de quatre
25 éléments formant pont 40e décalés angulairement les uns des autres d'environ 90°.

Dans cet exemple de réalisation, comme on le voit particulièrement sur les figures 13 et 14a, l'élément formant pont 40e est constitué d'une partie de poutre 42a de très faible longueur s'étendant transversalement à l'axe A et solidaire d'une patte de liaison
30 28 ancrée sur la face supérieur de la partie de guidage 22. Le pignon 151 et la partie de poutre 42a dont il est solidaire, ainsi que la patte de liaison 28, viennent de matière et peuvent être structurés, comme on le comprendra ci-après, lors d'une même étape de fabrication.

35 Ainsi, l'élément formant pont 40e qui s'élève au-dessus du plan de champ électrostatique PCE porte le pignon 151 qui forme un

élément mécaniquement fonctionnel apte à coopérer avec un organe complémentaire constitué par la roue 152 du mécanisme à entraîner, cet organe complémentaire 152 étant situé en dehors du plan de champ électrostatique PCE, à l'intérieur des trois groupes d'électrodes G101 à G103 et des quatre groupes de contre-électrodes g101 à g104.

Dans un autre exemple non représenté, la patte de liaison 28 est directement ménagée sous le pignon 151, au droit de celui-ci, la partie de poutre 42a étant omise.

Les figures 15 et 15a représentent un onzième mode de réalisation du micromoteur selon l'invention, dans lequel chaque bras 154 comporte à son extrémité libre, au-delà des contre-électrodes 26, un élément formant pont supplémentaire 40f qui comporte à son extrémité une roue 161 destinée à engrener avec un pignon 162 d'un mécanisme à entraîner. L'élément formant pont 40f présente une longueur environ trois fois plus grande que l'élément formant pont 40a qui supporte les deux contre-électrodes 26 des premier et second groupes de contre-électrodes g111 et g112 (la configuration de ce moteur étant proche de celle du mode de réalisation des figures 8 et 9). Ainsi, la roue 161 qui est disposée à l'extérieur du groupe d'électrodes G111 et des groupes de contre-électrodes g111 et g112 est écartée latéralement des électrodes 4 et n'interfère pas électrostatiquement avec ces dernières. Comme on le voit mieux sur la figure 15a, cette roue 161 est ménagée en dehors du plan de champ électrostatique puisqu'elle est supportée par une poutre 42b de l'élément formant pont 40f, qui est ménagée dans le prolongement de la poutre 42 de l'élément formant pont 40a. On précisera ici que les éléments formant pont 40a et 40f ainsi que la roue 161 viennent de matière et sont réalisés lors de la même étape de fabrication.

On remarquera que dans tous ces modes de réalisation qui viennent d'être décrits, d'une part les contre-électrodes 26 du rotor et d'autre part les éléments 4 du stator sont réalisé(e)s dans des secteurs géométriques présentant un angle au centre sensiblement égal. De plus, chaque groupe de contre-électrodes 26 comporte quatre contre-électrodes dont les axes médians respectifs Xce sont décalés l'un de l'autre d'un angle $X1$ d'environ 90° , tandis que chaque groupe d'électrodes comporte six électrodes dont les axes Xe sont respectivement décalés d'un angle $X2$ d'environ 60° . On peut donc

constater que lorsque que la ou les contre-électrodes 26 de deux bras diamétralement opposés sont sensiblement en coïncidence avec un ensemble E_n d'électrodes 4, la ou les contre-électrodes 26 des deux autres bras chevauchent partiellement simultanément deux autres ensembles d'électrodes 4 du stator 1. Ainsi, lorsque la ou les contre-électrodes 26 de deux bras diamétralement opposés ont été attirées électrostatiquement par deux ensembles diamétralement opposés d'électrodes 4, la ou les autres contre-électrodes des autres bras sont déjà engagées dans l'ensemble d'électrodes 4 qui va pouvoir les attirer. On comprend donc que pour faire fonctionner ce moteur, on alimente simultanément deux bornes d'alimentation qui sont connectées à deux ensembles d'électrodes (ou à deux électrodes) diamétralement opposé(e)s, puis qu'on alimente ensuite les bornes d'alimentation qui sont reliées aux deux ensembles d'électrodes (ou aux électrodes) voisin(e)s des précédent(e)s. On réalise donc un champ tournant qui permet de faire fonctionner le micromoteur en rotation continue ou en rotation pas à pas, unidirectionnelles ou bidirectionnelles. On a donc construit un moteur électrostatique à champ radial, à capacité variable et du type anti-synchrone puisque le rotor tourne en sens inverse du champ appliqué.

En effet, en se référant à la figure 1, en supposant que ce sont les ensembles E2 et E5 d'électrodes qui viennent d'être alimentés, on remarque que le rotor va se déplacer dans le sens des aiguilles d'une montre (flèche R) puisque les ensembles e2 et e4 des contre-électrodes vont venir en coïncidence avec les ensembles E2 et E5 précités. En même temps, les ensembles de contre-électrodes e1 et e3 sont venus chevaucher les ensembles E1 et E4 d'électrodes. Ainsi, pour faire avancer le moteur d'un pas suivant, il va falloir alimenter simultanément les ensembles E1 et E4 d'électrodes (flèche S). On observe donc qu'on est passé d'une alimentation de l'ensemble E2 (et E5) à l'ensemble E1 (et E4), ce qui est donc un sens opposé au sens des aiguilles d'une montre (et au sens de la flèche R).

En se référant désormais aux figures 16 à 46, on décrira ci-après un procédé de microfabrication photolithographique d'un micromoteur électrostatique, tel que celui du premier mode de réalisation décrit en référence aux figures 1 et 2.

On précisera que ces figures sont très schématiques et qu'elles ne correspondent pas exactement à l'échelle des figures précédentes. Les différents composant du micromoteur ne comportent pas dans ces figures les mêmes proportions dimensionnelles.

5 Ces figures 16 à 46 correspondent respectivement à trente phases du procédé de fabrication.

Dans la phase 1, on ménage par oxydation thermique une couche 200 de dioxyde de silicium (SiO_2) sur le substrat 2 qui est de préférence réalisé en silicium (Si).

10 Dans la phase 2, on structure à l'aide d'un masque approprié M1 et par attaque chimique à l'aide d'un acide, tel que de l'acide fluorhydrique tamponné dit BHF, la couche de dioxyde de silicium 200 pour dégager une ouverture importante jusqu'au substrat 2 et permettre l'accès à sa face supérieure.

15 Dans la phase 3, on dépose sur toute la surface de la pastille P deux couches 202 et 204 de SiO_2 par dépôt chimique en phase vapeur, la couche 202 comportant des impuretés dopantes, du type (n), désignées ci-après "dopant".

20 Ensuite, dans la phase 4, on fait subir à la pastille P un recuit pour faire diffuser la couche d'oxyde dopant 202 afin de doper une grande partie du substrat 2, excepté son bord périphérique situé sous la couche 200.

25 Ensuite, dans la phase 5, on attaque les couches 202 et 204 de SiO_2 pour ne laisser que la couche périphérique de dioxyde de silicium 200 ainsi qu'une région dopée du substrat 2. La région dopée du substrat 2 forme le plan de masse 36, tandis que la couche périphérique 200 forme une partie de la couche isolante 50 du stator 1. Dans cette même phase, on dépose sur la région dopée 36 et sur la couche périphérique 50 une nouvelle couche 206 de SiO_2 par dépôt chimique en phase vapeur, ce qui forme une barrière de diffusion vers l'extérieur de la pastille P.

30 Ainsi, dans ces cinq phases de fabrication, on a entre autres ménagé, sensiblement sur toute la surface du substrat 2, une première couche électriquement conductrice 36 qui, comme on peut le voir sur la figure 2, est destinée à alimenter la bague centrale 30.

35 Cette couche 36 permettra d'alimenter le rotor et ses contre-électrodes.

On se référera désormais aux figures 21 à 22 qui représentent les phases suivantes du procédé selon l'invention.

Dans la sixième phase on ménage par oxydation thermique sur toute la surface de la pastille P une couche 208 de SiO_2 destinée à permettre l'isolation électrique entre le plan de masse 36 et les électrodes 4 qui seront déposées et structurées ultérieurement.

Dans la phase 7, on dépose par dépôt chimique en phase vapeur à basse pression une couche 210 de nitrure de silicium (Si_3N_4). Dans ces deux phases 6 et 7 qui forment une deuxième étape importante du procédé, on a ménagé une première couche électriquement isolante 208 qui correspond à la couche 50 représentée sur la figure 2. La couche 210 formera la couche 52 (figure 2).

On se référera désormais aux figures 23 à 28 qui représentent respectivement les huitième au treizième phases du procédé selon l'invention.

Dans la phase 8, on dépose par un dépôt chimique en phase vapeur à faible pression une première couche de polysilicium 212 sur toute la surface de la pastille P, c'est-à-dire sur la couche 210 de Si_3N_4 préalablement déposée. Pour une meilleure compréhension de ce procédé, on référencera cette couche de polysilicium 212 "PolySi I".

Dans la phase 9, on dope électriquement cette couche de polysilicium en déposant sur celle-ci, par un dépôt chimique en phase vapeur, une couche d'oxyde dopant 214 en faisant ensuite subir à la pastille P un recuit permettant une diffusion du dopant vers la couche de PolySi I.

Dans la phase 10, on structure, par un jeu de masque M2 et à l'acide BHF, la couche 214 d'oxyde dopant déposé dans la phase 9.

Dans la phase 11, on structure par photolithographie au plasma avec le jeu de masque M2 la couche 212 de polysilicium I, ce qui fait apparaître la couche 210 de nitrure de silicium déposé dans la phase 7.

Ensuite, dans la phase 12, on attaque à l'acide BHF le reste d'oxyde dopant de la couche 214 pour complètement dégager la couche 212 de polysilicium I qui a été structurée. On a donc structuré dans cette étape (phases 8 à 12) par l'intermédiaire du jeu de masque M2 des pistes conductrices 6 (voir figure 1) en polysilicium, destinées à alimenter les électrodes 4 du stator.

Dans la phase 13, on dépose sur toute la pastille P par un dépôt chimique en phase vapeur à basse pression, une deuxième couche de nitrure de silicium Si_3N_4 . Cette deuxième couche de nitrure de silicium protège les couches sous-jacentes lors des attaques chimiques ultérieures et présente lors du fonctionnement du moteur un rôle de diminution du coefficient de frottement (le rotor 22 pouvant venir en appui par les éléments protubérants 23 sur le rotor 1, voir figure 2). Cette couche 216 présente aussi une fonction d'amélioration des caractéristiques mécaniques du micromoteur en offrant une protection à l'usure. Elle correspond à la couche 54 de la figure 2.

On précisera que d'autres matériaux, tels que le diamant, peuvent remplir cette fonction et être déposés à la place du Si_3N_4 .

Dans la phase 14, on dépose sur la pastille P une couche 218 de verre dopé au phosphore, généralement dénommé sous l'abréviation britannique "PSG".

Dans la phase 15, on fait subir à la pastille P un recuit pour aplanir la face extérieure de la couche 218. On appellera cette couche 218, couche "PSG I".

Dans la phase 16, on structure par l'intermédiaire d'un masque M3 des ouvertures dans la couche PSG I pour former, comme on l'expliquera ci-après, les éléments protubérants 23 du rotor 22. Cette structuration dans la couche PSG I se fait par attaque chimique à l'acide fluorhydrique tamponné.

Dans la phase 17, on dépose par dépôt chimique en phase vapeur une couche d'oxyde dopant 219 permettant le recouvrement de la seconde couche 216 de nitrure de silicium qui a été découverte lors de l'attaque chimique.

Dans la phase 18, on structure par un jeu de masques M4 des ouvertures supplémentaires dans la couche 218 de PSG I pour permettre la réalisation des supports 10 des électrodes 4 du stator, comme on le verra dans les étapes suivantes. Cette structuration photolithographique se fait au plasma. On remarquera donc que dans cette phase 18 on a ôté certaines régions de la couche 218 au droit de certaines parties des pistes conductrices 6, mais qu'on a aussi attaqué une partie de la couche de nitrure de silicium 216 se trouvant au-dessus de ces parties de pistes conductrices 6.

Dans la phase 19, on dépose sur la pastille P par un dépôt chimique en phase vapeur à faible pression une deuxième couche 220 de polysilicium, dite polysilicium II.

5 Dans la phase 20, on structure par photolithographie au plasma cette deuxième couche de polysilicium II par un jeu de masques M5, afin de définir la partie de guidage 22, les électrodes 4 du stator, les contre-électrodes 26 du rotor, ainsi qu'éventuellement les bornes d'alimentation 8 qui sont destinées à permettre l'alimenta-
10 tion des électrodes 4 du stator. Dans cette phase, on peut aussi structurer simultanément les extensions 105 des figures 9 à 15.

Dans la phase 21, on structure par le jeu de masques M5 et aussi au plasma la partie de la couche 218 de PSG I qui ne se trouve pas en dessous des éléments structurels 22, 4, 26 et 8. On précisera ici que la partie de la couche 218 de PSGI qui se trouve sous ces élé-
15 ments structurels constitue une couche sacrificielle qui sera ultérieurement éliminée par attaque chimique. On remarquera donc que dans les étapes 14 à 21 on a structuré avec interposition d'une première couche sacrificielle au moins un groupe d'électrodes 4 du stator conformé autour de l'axe de rotation du micromoteur, de façon
20 angulairement décalée (figure 1), ainsi que simultanément la partie de guidage 22 du rotor, au moins une contre-électrode 26 du rotor et de préférence les bornes d'alimentation 8 ainsi qu'éventuellement les extensions 105. Ces phases 14 à 21 constituent donc une étape supplémentaire essentielle du procédé selon l'invention.

25 Dans la phase 22 (figure 37), on dépose par dépôt chimique en phase vapeur une deuxième couche 222 de verre dopé au phosphore (PSG II) sur les éléments fonctionnels qui viennent d'être structurés dans les phases précédentes.

Dans la phase 23, on attaque par structuration photolithogra-
30 phique au plasma une partie de cette deuxième couche 222 de PSG II, ainsi que certaines régions des deux couches de nitrure de silicium 216, 210 et de la couche de dioxyde de silicium 50. Dans cette phase on prépare donc la réalisation de la bague centrale 30 ainsi que celle des bornes 38 d'alimentation du plan de masse 36. Cette
35 structuration se fait par un jeu de masques M6.

Dans la phase 24, on structure de nouveau par photolithographie au plasma par un masque M7 certaines parties de la seconde couche

222 de PSG II pour permettre l'ancrage sur la partie de guidage 22 et sur les contre-électrodes 26 des pattes de liaison 28, ainsi qu'éventuellement la réalisation d'une borne d'alimentation 39 (figure 31) permettant l'alimentation des pistes 6.

5 Dans la phase 25, on dépose par dépôt chimique en phase vapeur à faible pression une troisième couche 224 de polysilicium, appelée polysilicium III, et ce sur toute la face de la pastille P.

10 Ensuite, dans la phase 26, on structure par photolithographie au plasma par un masque M8 la troisième couche 224 de polysilicium III pour ne laisser que les parties fonctionnelles que l'on souhaite. On dégage ainsi une partie de la seconde couche 222 de verre dopé au phosphore (PSG II).

15 Dans la phase 27, on dépose sur toute la pastille P par dépôt en phase vapeur une couche 226 d'oxyde dopant SiO_2 pour ensuite faire subir à la pastille P un recuit permettant le dopage des seconde et troisième couches de polysilicium II et III respectivement les rendant aussi conductrices.

20 Dans la phase 28, on attaque à l'acide une partie des couches sacrificielles les plus accessibles (c'est-à-dire les parties exposées en surface) pour préparer un dépôt d'aluminium sur les bornes d'alimentation.

25 On comprend donc que dans ces phases 22 à 28, on a structuré avec interposition d'une deuxième couche sacrificielle et au-dessus de la partie de guidage 22, des électrodes 4 du rotor et des bornes d'alimentation 8, d'une part la bague centrale de guidage 30, mais aussi plusieurs éléments formant pont 40 qui constituent, comme on l'a expliqué ci-avant, des bras surélevés du rotor associés à des organes mécaniquement ou électriquement fonctionnels.

30 Dans ce procédé, on a représenté uniquement comme élément fonctionnel une contre-électrode 26, mais bien entendu, on aurait pu représenter le pignon 151 ou encore la roue 161, respectivement des figures 14 et 15.

Dans la phase 29, on dépose par évaporation une couche d'aluminium 228 sur la pastille P.

35 Dans la phase 30, on structure à l'aide d'un masque M9 la couche d'aluminium 228 pour ne laisser qu'une pellicule sur les bornes

d'alimentation 8 et 38 et permettre la liaison avec un circuit électronique de commande, non représenté.

5 Dans la phase 31, on attaque à l'aide de l'acide fluorhydrique tamponné (BHF) pendant un temps relativement long les couches sacrificielles restantes formées respectivement par les deux couches de verre dopé au phosphore PSG I et PSG II.

10 On remarquera que pour faciliter l'attaque chimique des couches sacrificielles sous-jacentes, la partie de guidage 22 du rotor comporte des ouvertures axiales débouchantes 25 convenablement réparties (par exemple réalisées dans la phase 20) permettant une meilleure irrigation de l'acide d'attaque.

15 Par ailleurs, bien qu'on ait représenté une seule électrode 4 du rotor, il est bien évident qu'on peut réaliser simultanément plusieurs groupes d'électrodes coaxiaux, tels que les groupes G1 à G3 de la figure 1. A la place des bornes d'alimentation 8, on peut former un groupe d'électrodes 4 en éliminant sur celles-ci la couche d'aluminium.

20 De même, on peut réaliser simultanément et avec une même couche plusieurs groupes de contre-électrodes, tel que les groupes g1 à g4 de la figure 1, disposés de part et d'autre des groupes d'électrodes G_n. Les éléments formant pont 40a à 40d sont aussi réalisés simultanément. Ils sont réalisés avec une autre couche de polysilicium (entre autre la couche de polysilicium III) que les électrodes et les contre-électrodes. Les éléments formant pont étant ménagés les
25 uns dans le prolongement des autres, leur patte de liaison 26 vient s'ancrer sur la partie de guidage 22 ou sur la ou les contre-électrodes correspondantes qui sont formées par des couches sous-jacentes.

30 On comprend donc que grâce à la disposition des éléments formant pont qui peuvent être avantageusement réalisés en même temps que la bague centrale 30, on a pu à la fois répondre au problème de la transmission du couple par une liaison mécanique judicieuse entre le rotor et un pignon ou une roue dentée, et au problème de l'augmentation du couple moteur transmissible en multipliant le nombre d'entrefer, et ce grâce à la construction d'une structure interdigitée.
35

REVENDEICATIONS

1. Micromoteur électrostatique à champ radial, réalisé par microfabrication photolithographique, du type comprenant

- un stator (1) comportant au moins un groupe (G_n) de plusieurs électrodes (4) angulairement décalées autour d'un axe de rotation (A) du micromoteur, ces électrodes (4) qui sont connectées électriquement à un circuit de commande étant supportées par un substrat (2),

- un rotor (20, 60 - 160), de préférence réalisé au moins en partie en un matériau électriquement conducteur, comportant au moins une contre-électrode (26) apte à venir évoluer en regard de chaque électrode (4) du stator (1), sensiblement dans un même plan dit plan de champ électrostatique (PCE), le jeu laissé entre ladite contre-électrode (26) et les électrodes correspondantes (4) formant un entrefer,

- une bague (30) formant palier qui est susceptible d'être électriquement alimentée et qui est solidaire dudit substrat (2), ledit rotor étant guidé en rotation, et éventuellement en translation, autour de cette bague (30) par l'intermédiaire d'une partie de guidage (22) dont est solidaire ladite contre-électrode, caractérisé en ce que ledit rotor comporte au moins un élément formant pont (40a-f) qui est disposé au moins en partie au-dessus du plan de champ électrostatique (PCE), cet élément qui constitue un bras surélevé du rotor portant un ou plusieurs organes mécaniquement ou électriquement fonctionnels (26, 151, 161) aptes à coopérer avec un ou plusieurs organes complémentaires (4, 152, 162) situés dans ou en dehors du plan de champ électrostatique (PCE) et à l'intérieur ou à l'extérieur dudit groupe (G_n) d'électrodes du stator (1).

2. Micromoteur selon la revendication 1, caractérisé en ce que ledit organe est constitué par ladite contre-électrode (26) du rotor qui est ménagée entre ledit groupe d'électrodes formant un premier groupe (G_1) et un deuxième groupe d'électrodes (G_2) ménagé de façon coaxiale au premier, le jeu laissé entre ladite contre-électrode (26) et le deuxième groupe d'électrodes (G_2) formant un deuxième entrefer.

3. Micromoteur selon la revendication 1, caractérisé en ce que chaque bras du rotor (80) comporte n éléments formant pont ménagés les uns dans le prolongement des autres, ces n éléments formant pont (40a, 40b) comportant respectivement n contre-électrodes (26) coopérant de façon interdigitée avec au moins n groupes (G41, G42) d'électrodes disposés de façon coaxiale (4), pour former au moins $2 \times n - 1$ entrefers.

4. Micromoteur selon la revendication 3, caractérisé en ce qu'il comporte $n+1$ groupes d'électrodes (G51, G52, G53) formant deux à deux une zone de champ électrostatique dans laquelle se déplace une des contre-électrodes (26) pour former $2 \times n$ entrefers.

5. Micromoteur selon la revendication 1, caractérisé en ce que ledit organe est constitué par une contre-électrode supplémentaire (26), dite deuxième contre-électrode, cette deuxième contre-électrode étant ménagée à l'extérieur du groupe d'électrodes du stator (G61), le jeu laissé entre cette deuxième contre-électrode et le groupes d'électrodes (G61) formant un entrefer supplémentaire.

6. Micromoteur selon la revendication 5, caractérisé en ce que chaque bras du rotor comporte n éléments formant pont ménagés les uns dans le prolongement des autres, ces n éléments formant pont comportant respectivement $n+1$ contre-électrodes coopérant avec au moins n groupes d'électrodes (G81, G82) pour former au moins $2 \times n$ entrefers.

7. Micromoteur selon la revendication 6, caractérisé en ce qu'il comporte $n+1$ groupes (G91, G92 et G93) d'électrodes pour former, avec les $n+1$ contre-électrodes, $2 \times n+1$ entrefers.

8. Micromoteur selon la revendication 1, caractérisé en ce que l'organe de l'élément formant pont est constitué par un pignon (151) ou une roue (161) conformé pour venir s'engrener avec respectivement une roue ou un pignon d'un mécanisme à entraîner.

9. Micromoteur selon la revendication 8, et l'une des revendications 1, 2, ou 5, caractérisé en ce que l'élément formant pont comporte, en plus d'un organe électriquement fonctionnel constitué par une contre-électrode (26) du rotor, un pignon ou une roue.

10. Micromoteur selon la revendication 8, et selon l'une des revendications 3, 4, 6 ou 7, caractérisé en ce que le i ème élément

formant pont ou élément formant pont terminal comporte la roue (161).

11. Micromoteur selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que ledit pignon (151) ou ladite roue (161) sont rendus solidaires du rotor par l'intermédiaire d'au moins deux éléments formant pont (40e, 40f), de préférence disposés sur le rotor de façon diamétralement opposée.

12. Micromoteur selon la revendication 11, caractérisé en ce que ledit pignon (151) ou ladite roue (161) est solidaire du rotor par l'intermédiaire de quatre bras décalés les uns par rapport aux autres d'environ 90°.

13. Procédé de réalisation photolithographique d'un moteur électrostatique, tel que celui des revendications 1 à 12, caractérisé en ce qu'il consiste :

a) - de préférence à ménager sensiblement sur toute la surface d'un substrat (2), une première couche électriquement conductrice (36) destinée à alimenter une bague centrale (30) apte à guider et à contacter une partie de guidage (20) d'un rotor du micromoteur,

b) - à ménager au moins une première couche électriquement isolante (50) sur cette couche conductrice,

c) - à structurer des pistes conductrices (6) sur ladite première couche isolante (50), ces pistes étant destinées à alimenter des électrodes (4) du stator (1) par l'intermédiaire d'un circuit de commande du micromoteur,

d) - à déposer au moins partiellement sur les couches précédentes de préférence une couche présentant une fonction protectrice et une fonction de diminution du frottement et d'isolation électrique,

e) - à structurer, avec interposition d'une première couche sacrificielle (218), au moins un groupe (G1) d'électrodes (4) angulairement décalées autour d'un axe A de rotation du micromoteur, ainsi que simultanément ladite partie de guidage (22) du rotor et au moins une contre-électrode (26) du rotor (20),

f) - à structurer au-dessus de ces électrodes (4) et de ces contre-électrodes (26) ainsi qu'au-dessus de cette partie de guidage (22), avec interposition d'une deuxième couche sacrificielle (222), ladite bague centrale (30) ainsi qu'au moins un élément formant pont (40) constituant un bras surélevé du rotor destiné à être associé à

au moins un organe (26, 151, 161) mécaniquement ou électriquement fonctionnel, tel qu'un pignon ou une roue,

g) - puis à éliminer par attaque chimique les couches sacrificielles (218, 222).

5 14. Procédé selon la revendication 13, caractérisé en ce que dans l'étape f) on structure simultanément des bornes d'alimentation (8, 38) et des électrodes (4).

10 15. Procédé selon la revendication 13 ou 14, caractérisé en ce que dans l'étape e) on structure au moins une extension formant bras (105) destinée à former la liaison mécanique entre la partie de guidage (22) du rotor et la ou les contre-électrodes (26).

16. Procédé selon une des revendications 13 à 15, caractérisé en ce que dans l'étape e) on structure simultanément plusieurs groupes d'électrodes (G_n) ménagés de façon coaxiale.

15 17. Procédé selon la revendication 15 ou 16, caractérisé en ce que dans l'étape e) on réalise plusieurs contre-électrodes disposées de part et d'autre du ou des groupes de contre-électrodes.

20 18. Procédé selon la revendication 16 ou 17, caractérisé en ce que dans l'étape f) on réalise simultanément plusieurs éléments formant pont (40a-f) sensiblement alignés les uns dans le prolongement des autres, venant se lier à une contre-électrode sous-jacente correspondante.

25

30

35

1/15

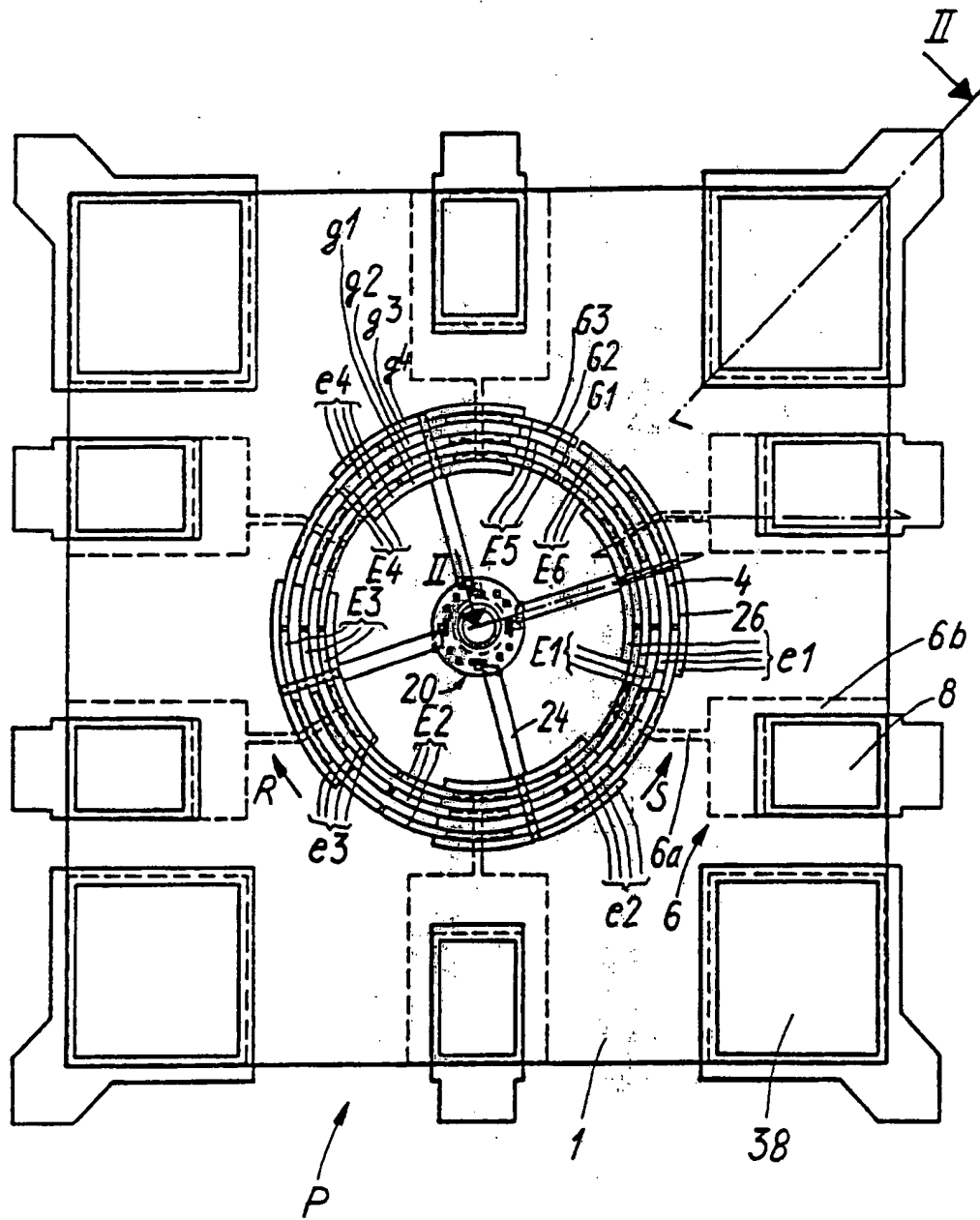


Fig. 1

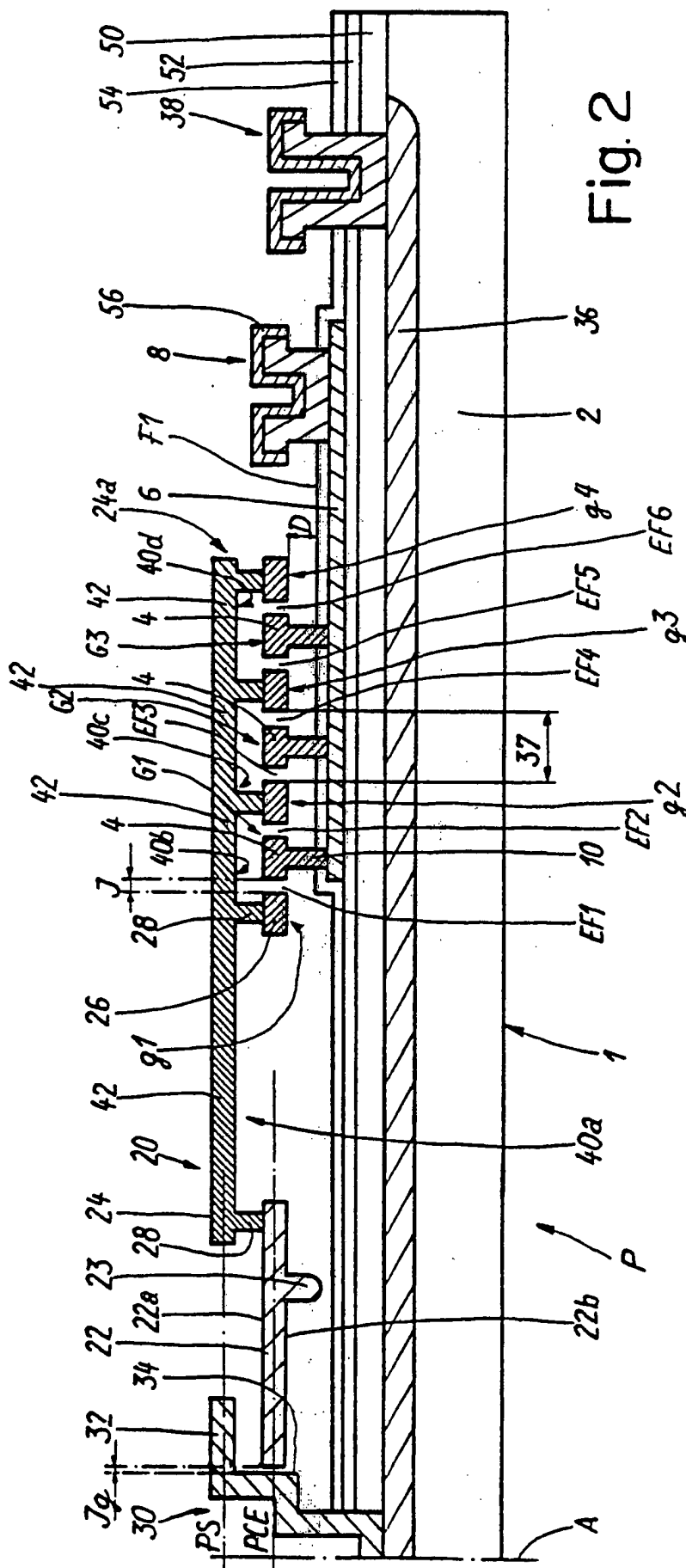


Fig. 2

3/15

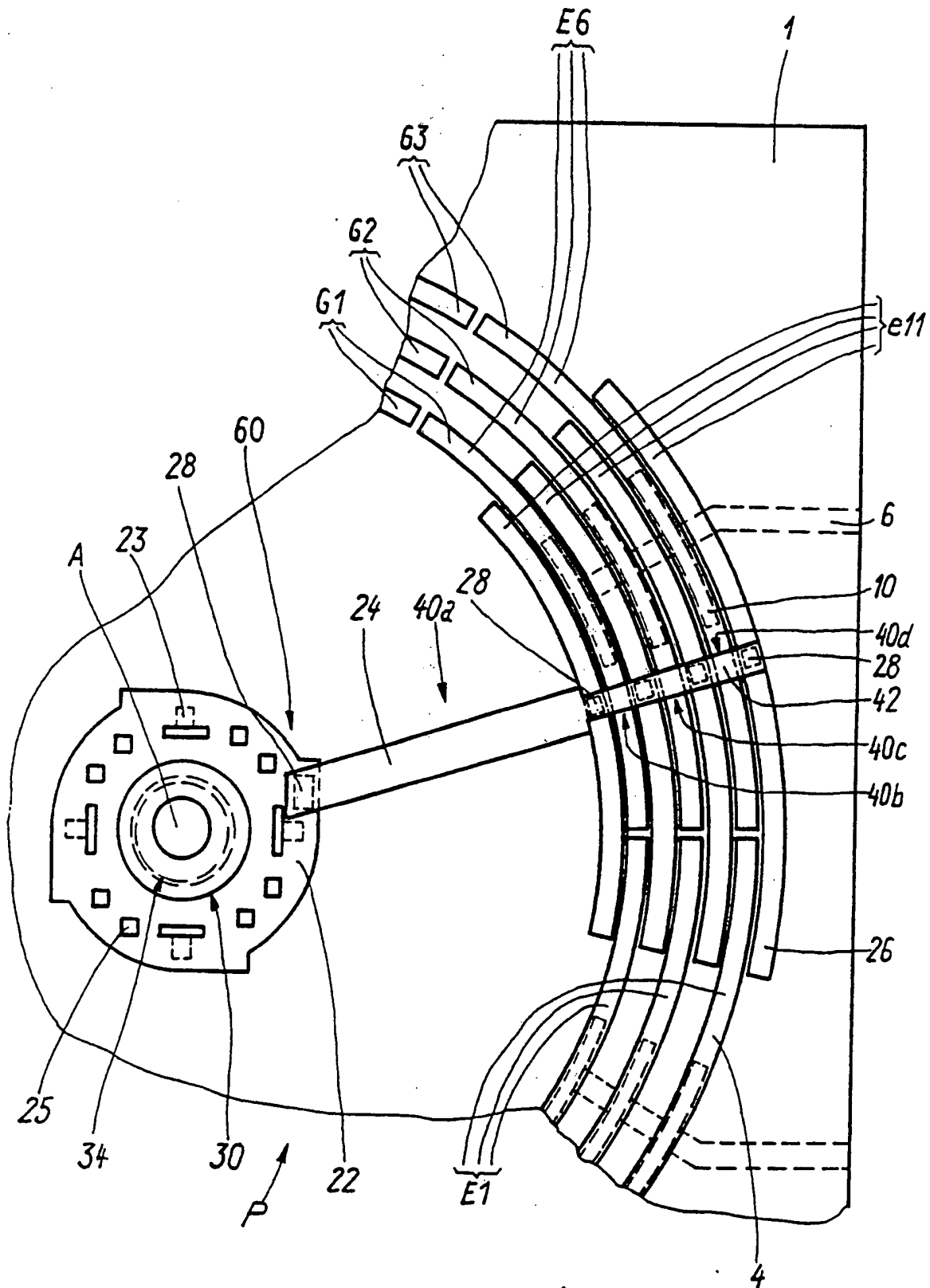
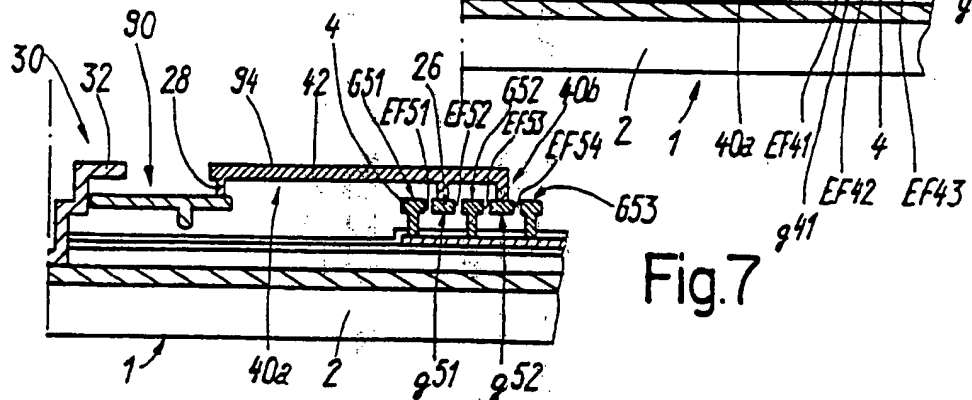
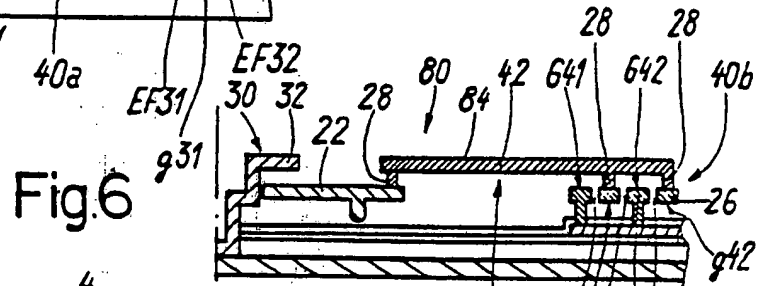
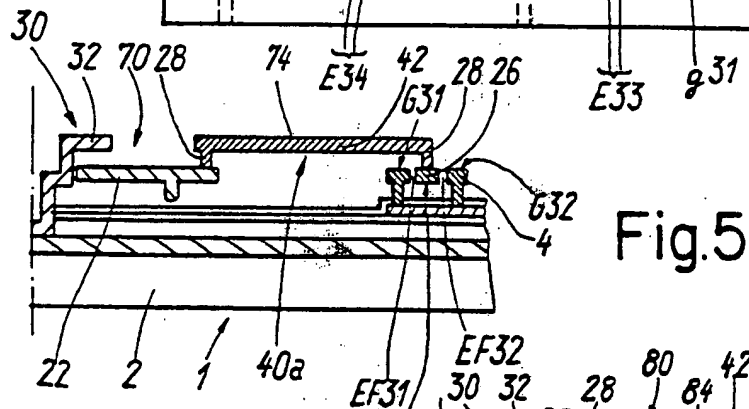
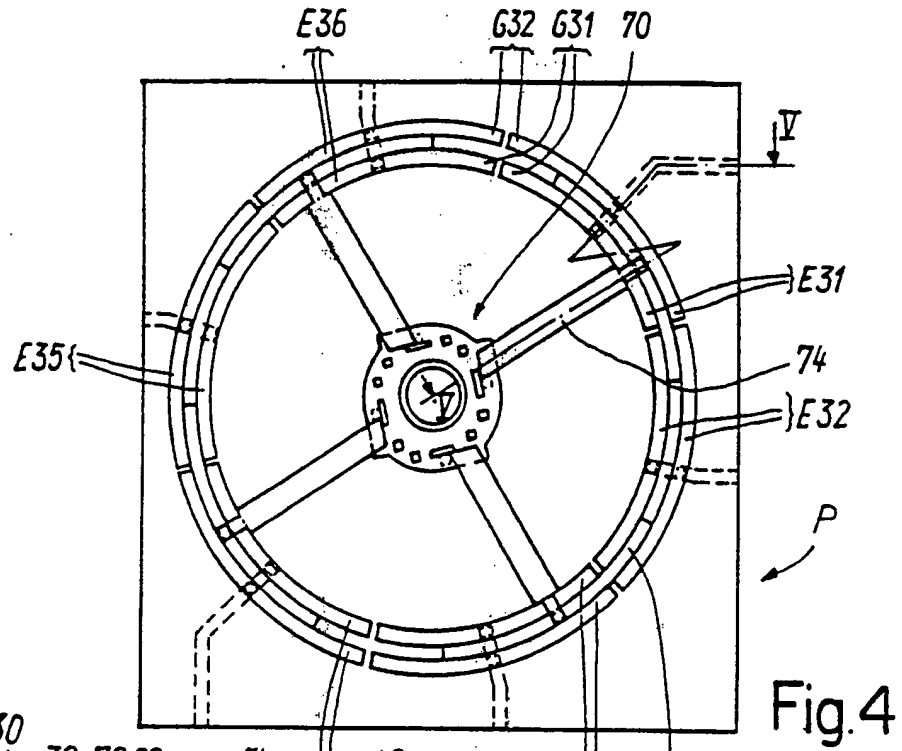


Fig. 3

4/15



5/15

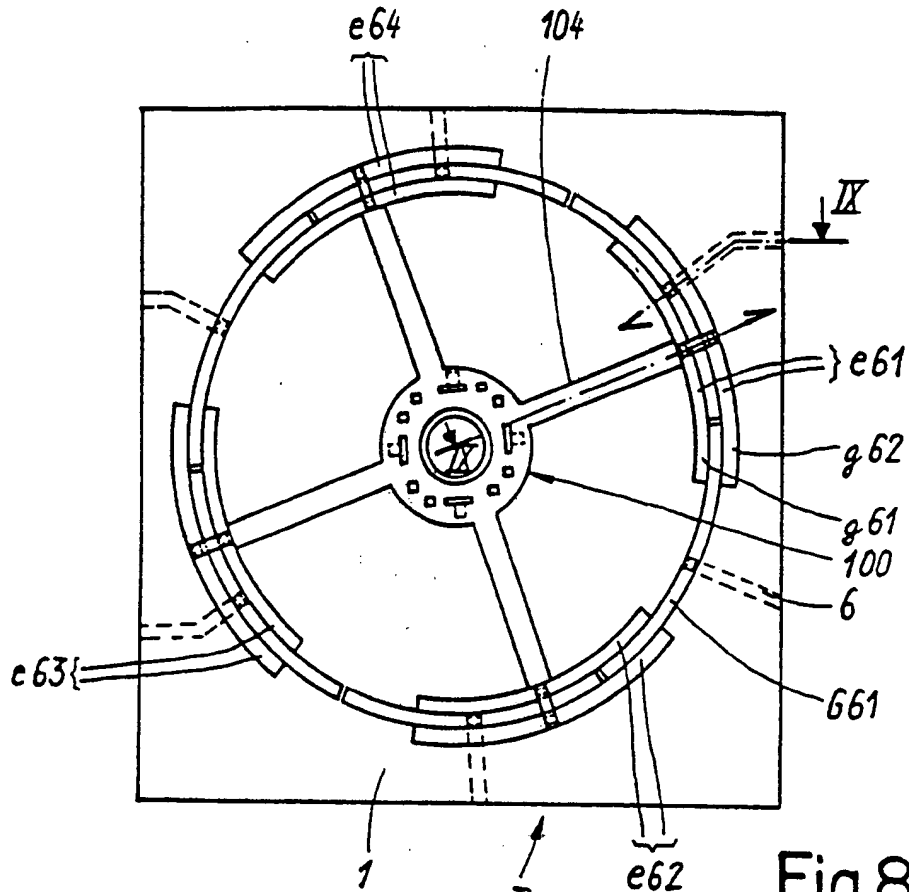


Fig. 8

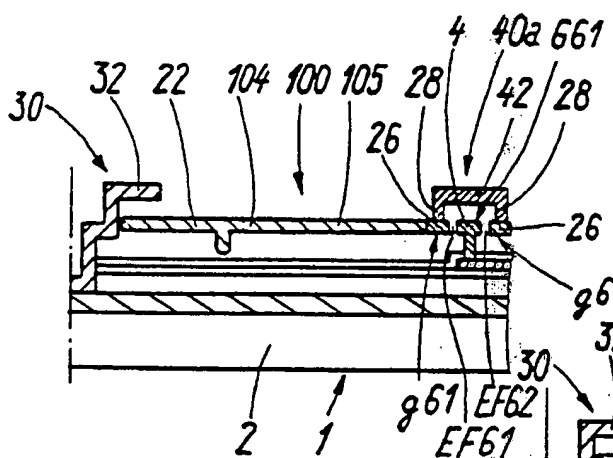


Fig. 9

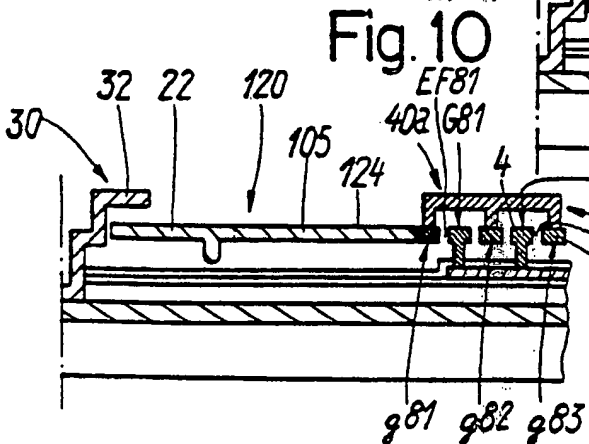


Fig. 10

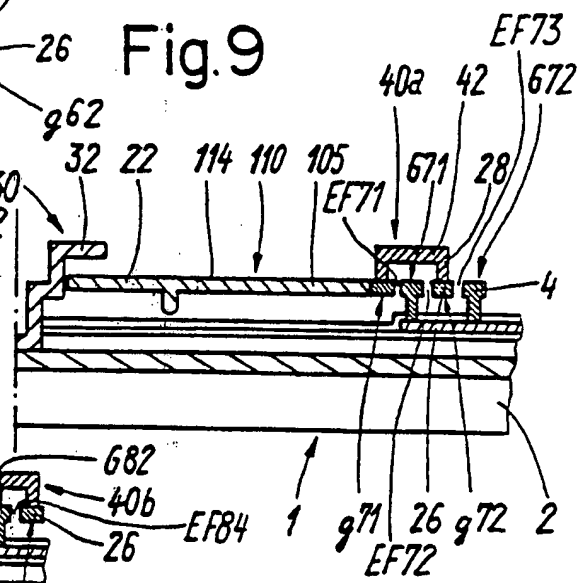


Fig. 11

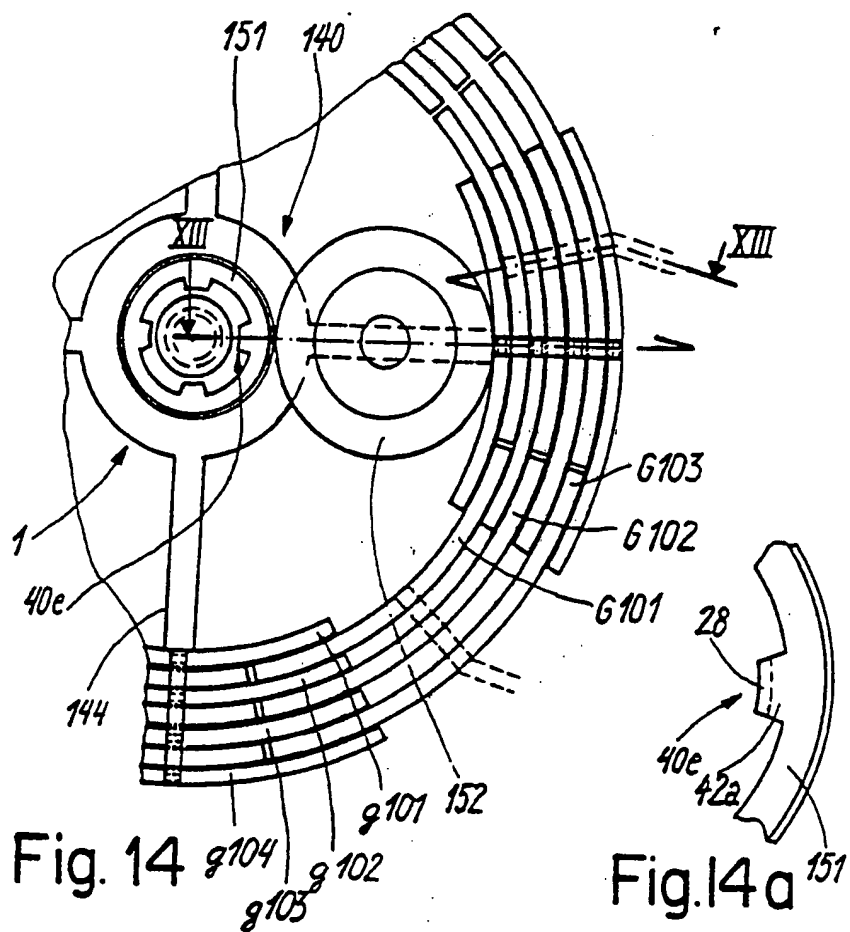
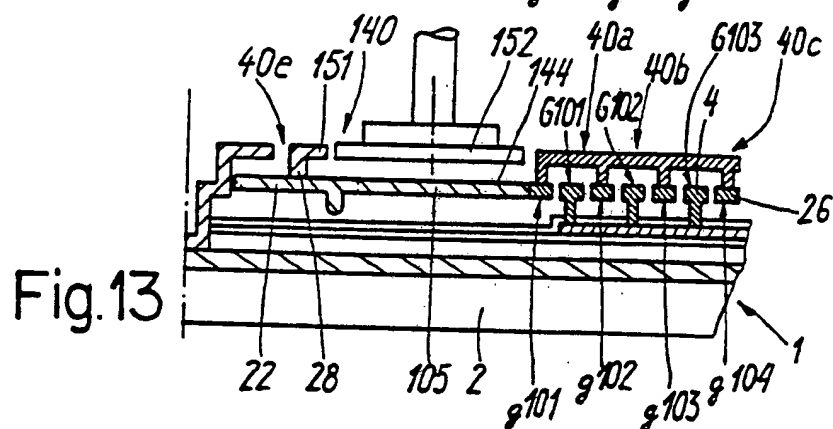
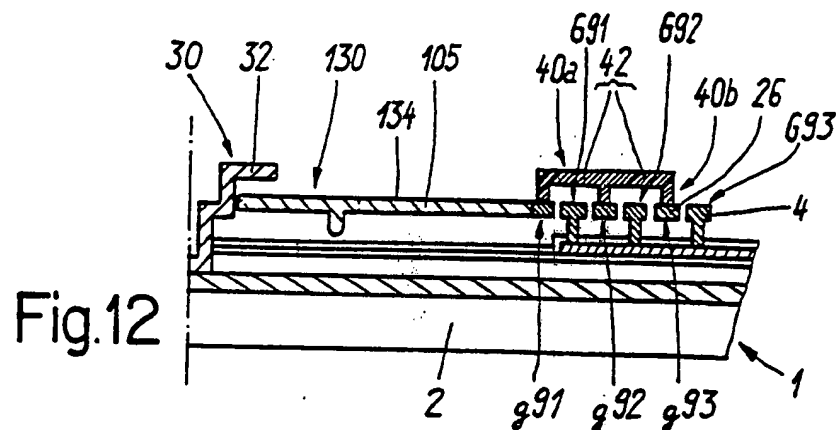
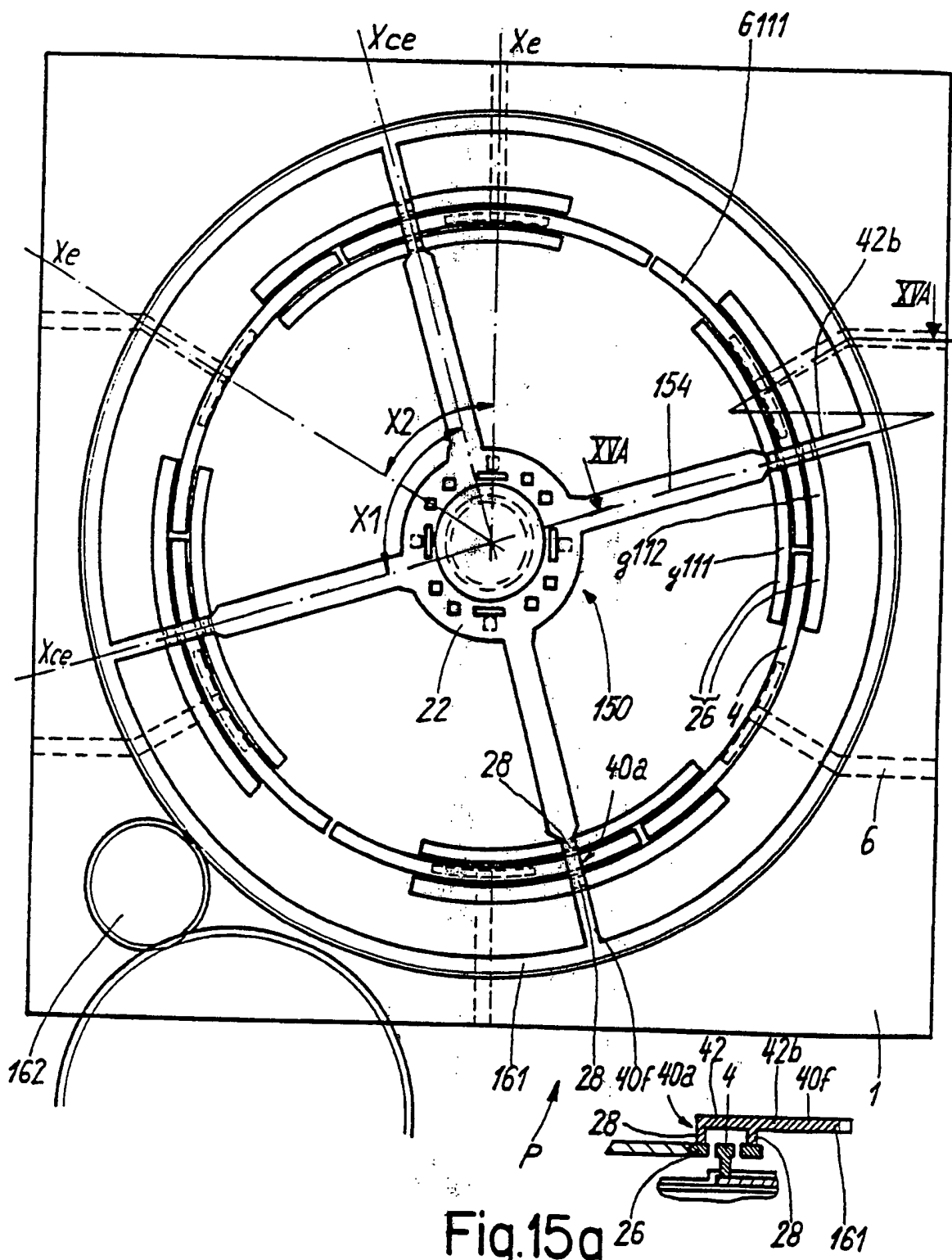


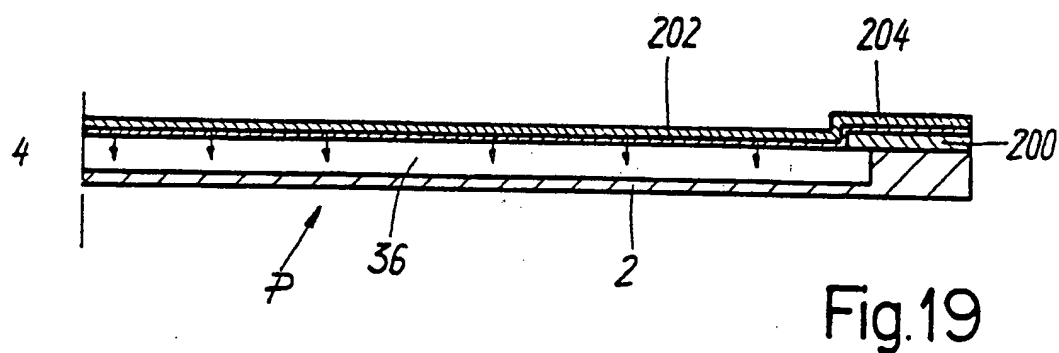
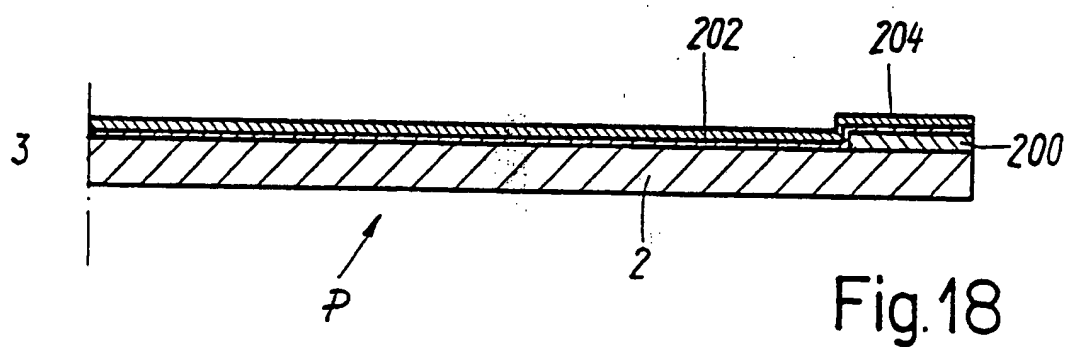
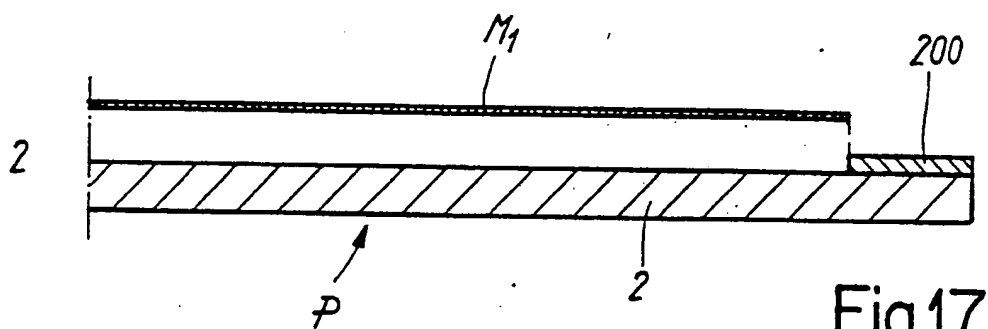
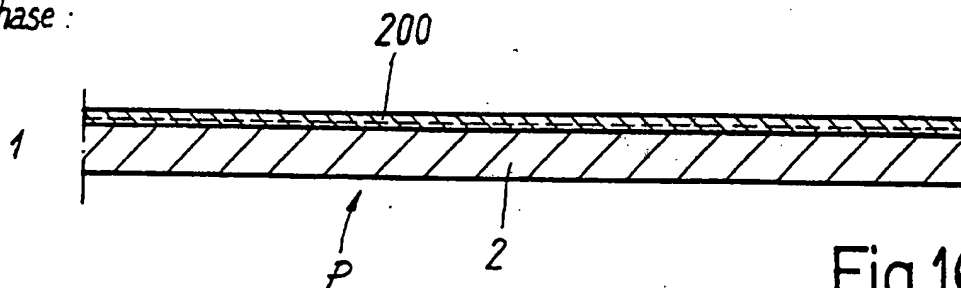
Fig. 14a ¹⁵¹

Fig. 15



8/15

Phase :



10/15

Phase :

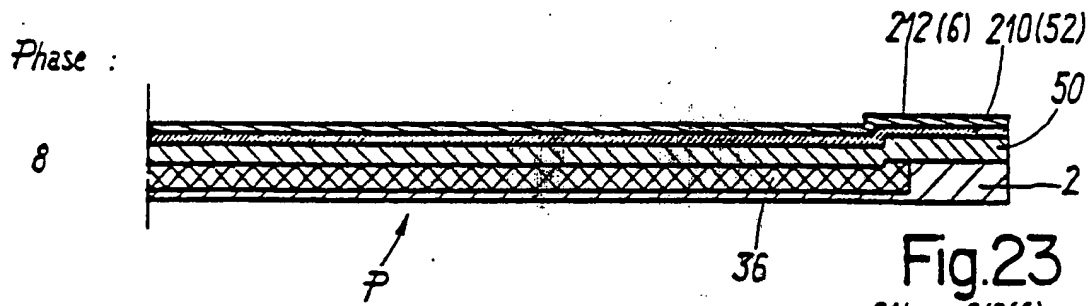


Fig.23

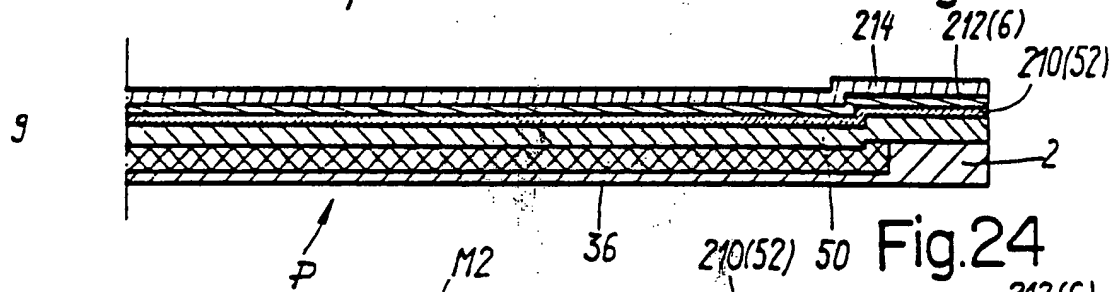


Fig.24

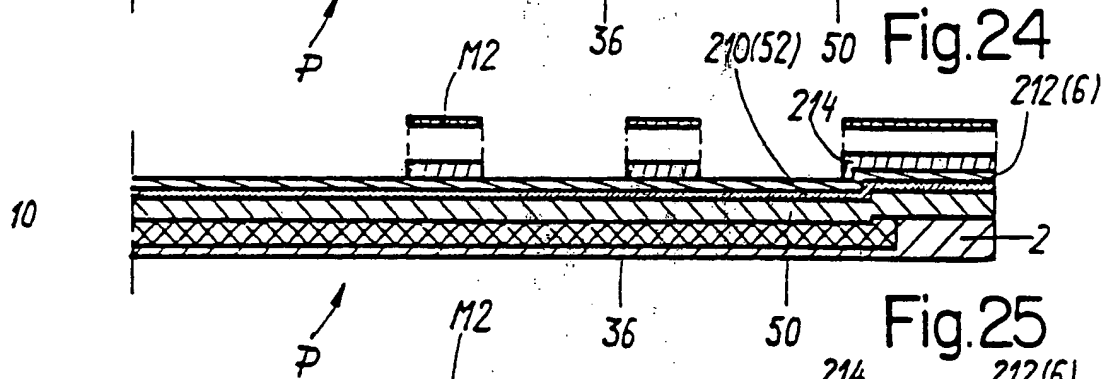


Fig.25

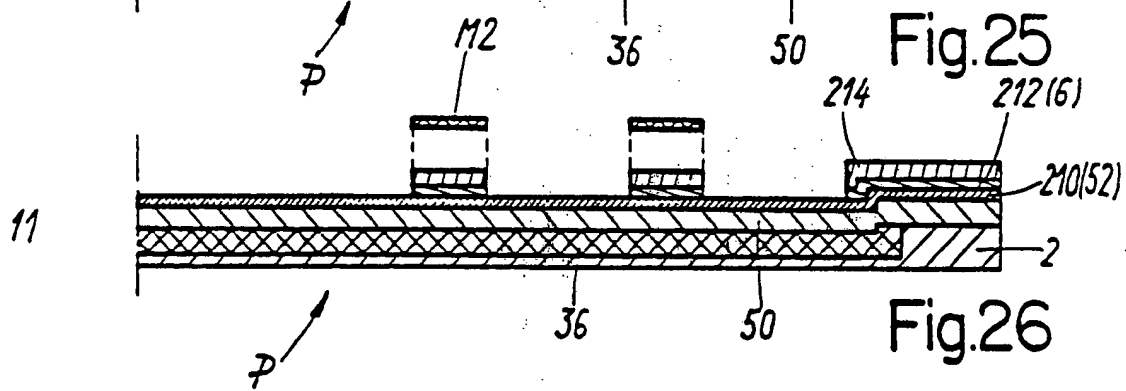


Fig.26

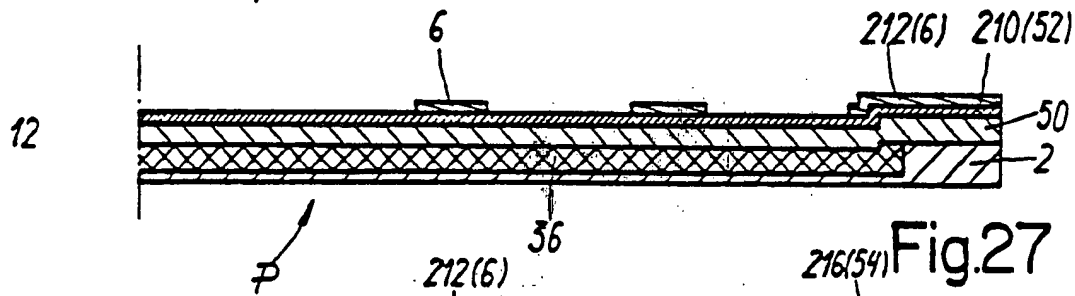


Fig.27

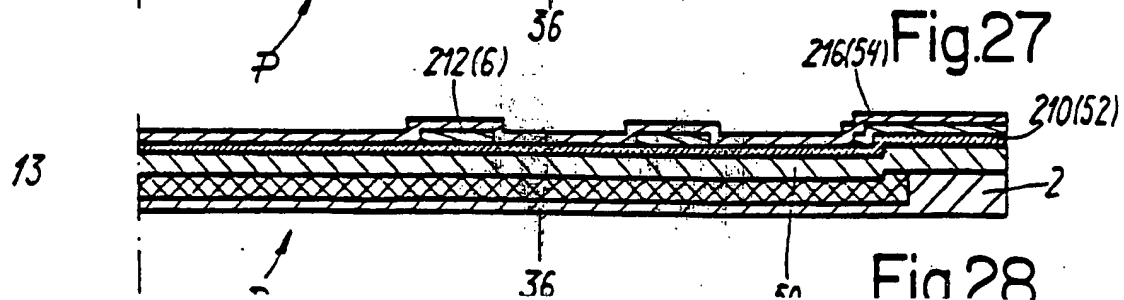
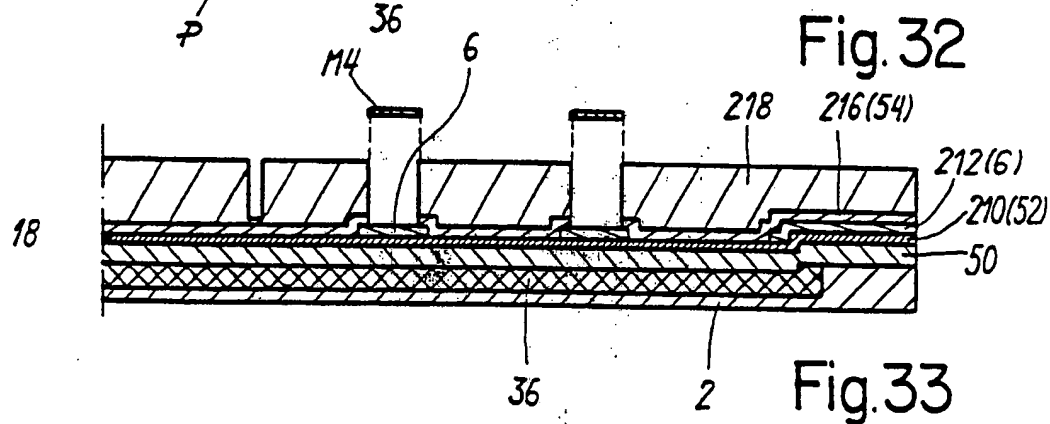
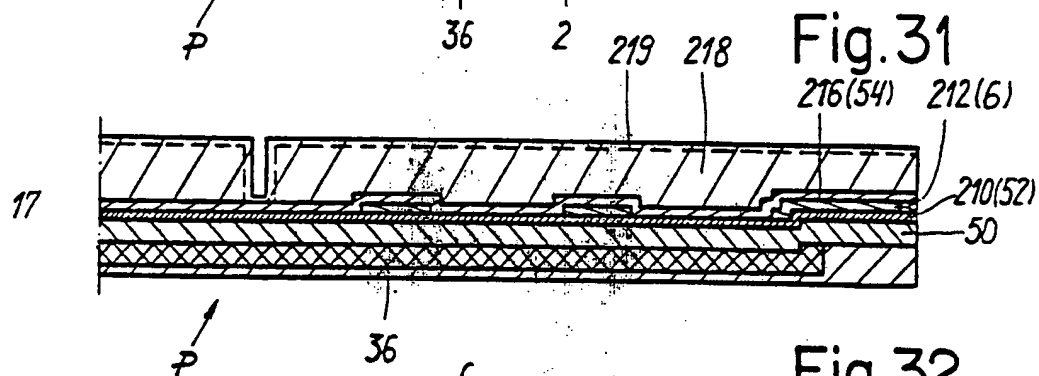
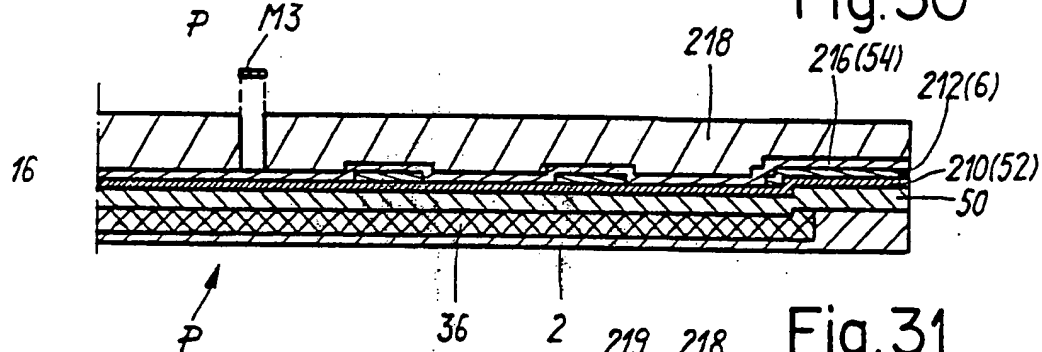
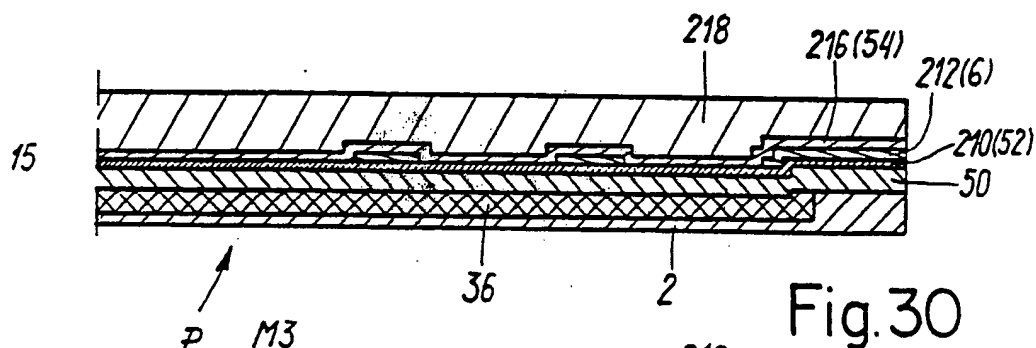
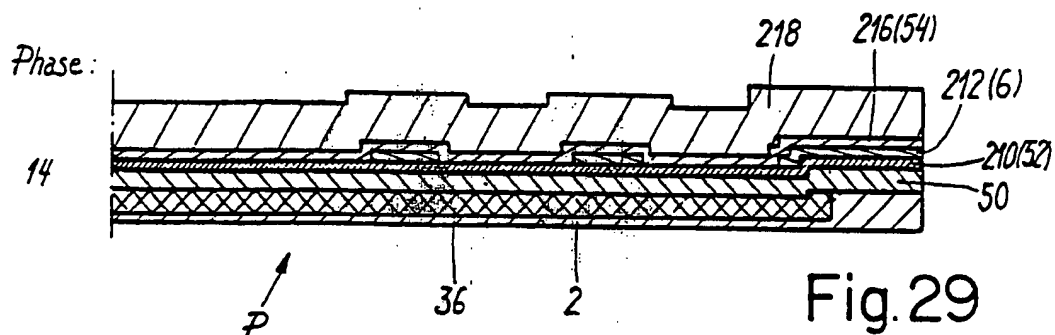


Fig.28

11/15



12/15

Phase

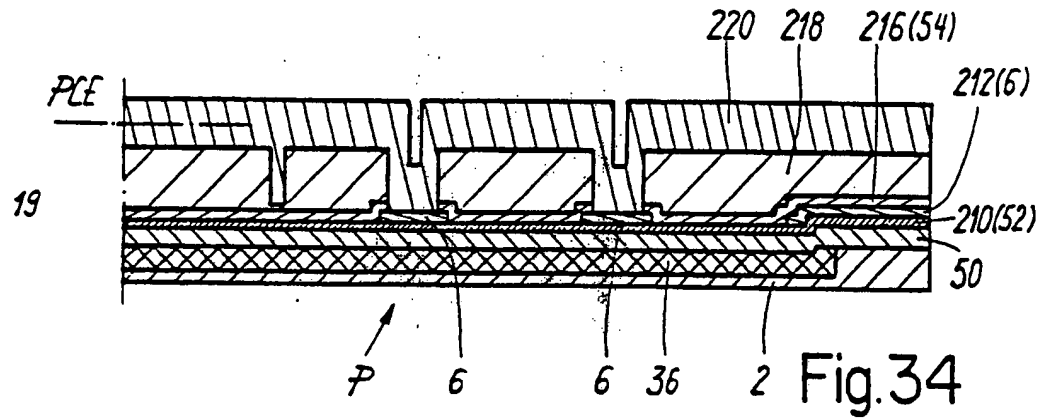


Fig.34

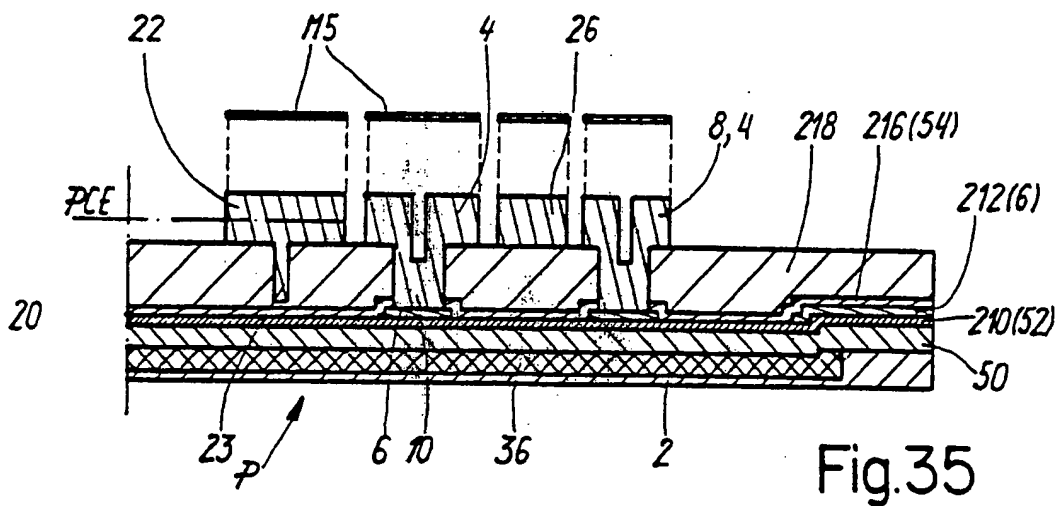


Fig.35

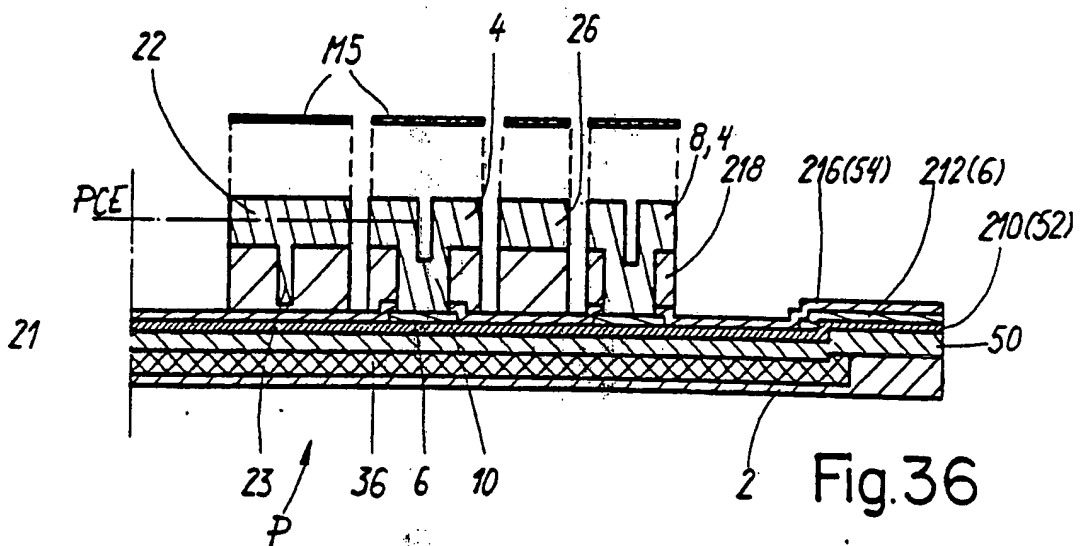


Fig.36

13/15

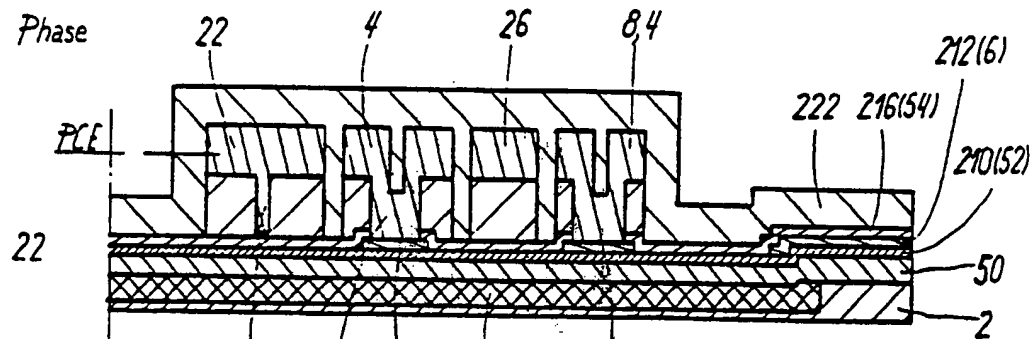


Fig. 37

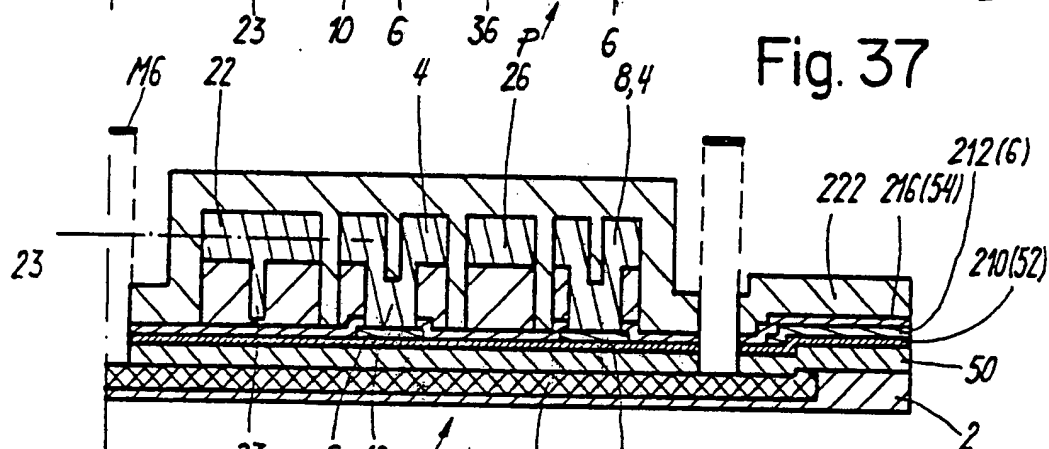


Fig. 38

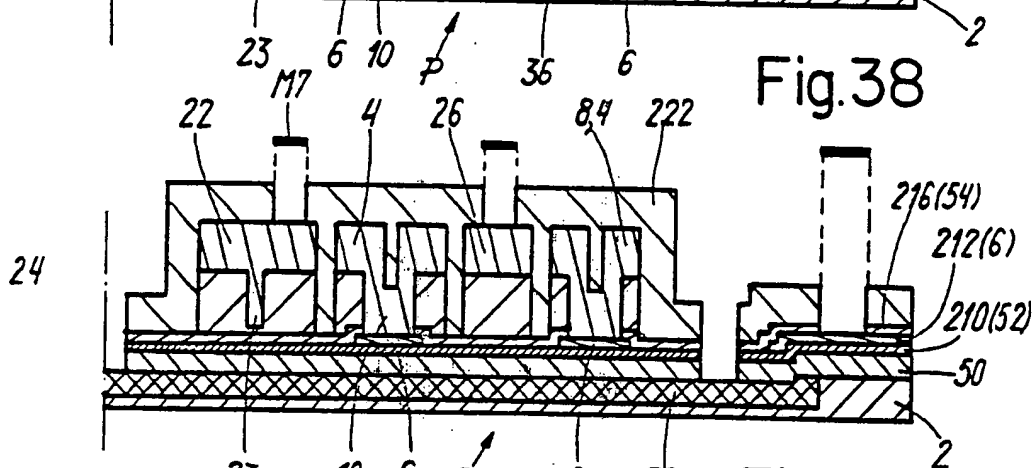


Fig. 39

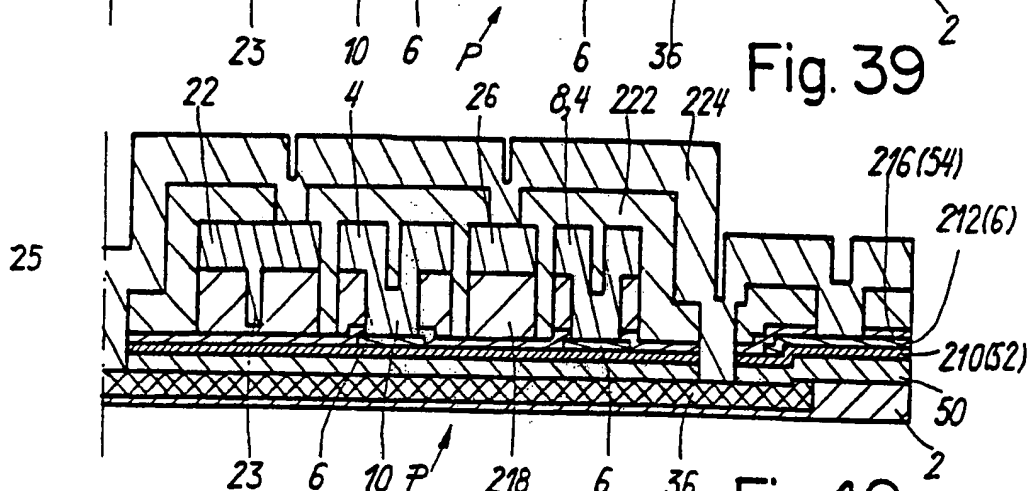
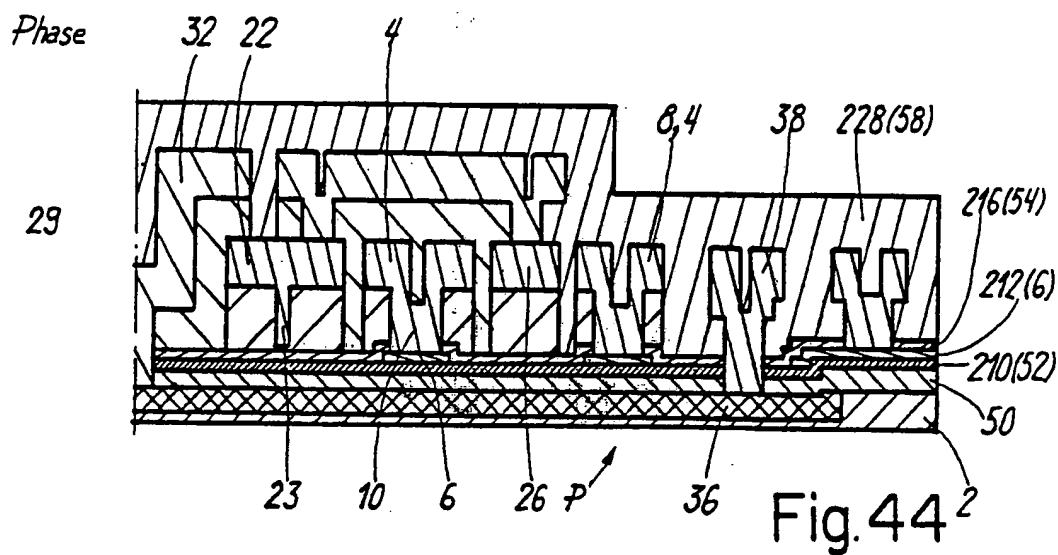


Fig. 40

15/15



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No PCT/CH 91/00030

I. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER (If several classification symbols apply, indicate all) * According to International Patent Classification (IPC) or to both National Classification and IPC Int.Cl. ⁵ : H 02 N 1/00						
II. FIELDS SEARCHED <div style="text-align: center; margin-top: 10px;">Minimum Documentation Searched ?</div> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 30%; padding: 5px;">Classification System</td> <td style="padding: 5px;">Classification Symbols</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">Int.Cl.⁵:</td> <td style="padding: 5px;">H 02 N; H 01 H; H 02 K</td> </tr> </table> <div style="text-align: center; margin-top: 10px;">Documentation Searched other than Minimum Documentation to the extent that such Documents are included in the Fields Searched *</div>			Classification System	Classification Symbols	Int.Cl. ⁵ :	H 02 N; H 01 H; H 02 K
Classification System	Classification Symbols					
Int.Cl. ⁵ :	H 02 N; H 01 H; H 02 K					
III. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT *						
Category *	Citation of Document, ¹¹ with indication, where appropriate, of the relevant passages ¹²	Relevant to Claim No. ¹³				
Y	SENSOR AND ACTUATORS. vol. 20, No: 1/2, 15 November 1989, LAUSANNE CH, pages 41-47; LONG-SHEN FAN etc.: "IC-processed electrostatic micromotors" see page 41, right column, lines 5-12, see page 43, right column, line 28 - page 45, right column, line 18; figures 1,3,5-11	1-4				
A	--	13				
Y	FR, A, 1521852 (PHILIPS) see page 1, right column, line 38 - page 2, left column, line 5, see page 2, left column, line 47 - right column, line 1; figures 1,2	1-4				
A	--	8,9				
A	US, A, 3629624 (JUERGEN H. STAUDTE) 21 December 1971 see column 3, line 55 - column 4, line 15; figures 1,2	1-4, 13				
A	THIN SOLID FILMS. vol. 181, No: 1, 10 December 1989, Lausanne CH, pages 235 - 243; ROGER T. HOWE: "Microsensor and microactuator applications of thin films" see the whole document	1-4, 13				
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>* Special categories of cited documents: ¹⁰</p> <p>"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance</p> <p>"E" earlier document but published on or after the international filing date</p> <p>"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)</p> <p>"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means</p> <p>"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p> </div> <div style="width: 45%;"> <p>"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention</p> <p>"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step</p> <p>"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art</p> <p>"Z" document member of the same patent family</p> </div> </div>						
IV. CERTIFICATION						
Date of the Actual Completion of the International Search	Date of Mailing of this International Search Report					
10 May 1991 (10.05.91)	13 June 1991 (13.06.91)					
International Searching Authority	Signature of Authorized Officer					
European Patent Office						

**ANNEX TO THE INTERNATIONAL SEARCH REPORT
ON INTERNATIONAL PATENT APPLICATION NO.**

**CH9100030
SA 43995**

This annex lists the patent family members relating to the patent documents cited in the above-mentioned international search report.
The members are as contained in the European Patent Office EDP file on
The European Patent Office is in no way liable for these particulars which are merely given for the purpose of information.

10/05/91

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
FR-A-1521852		BE-A- 697890	03-10-67
		CH-A- 484551	15-01-70
		DE-A- 1613330	08-04-71
		NL-A- 6605934	06-11-67
		US-A- 3436630	01-04-69

US-A-3629624	21-12-71	None	

Formulaire PCT/ISA/210 (deuxième feuille) (Janvier 1985)

III. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS ¹⁴(SUITE DES RENSEIGNEMENTS INDICUES SUR LA
DEUXIEME FEUILLE)

Catégorie ^o	Identification des documents cités, ¹⁶ avec indication, si nécessaire des passages pertinents ¹⁷	No. des revendications visées ¹⁸
A	US,A,3629624 (JUERGEN H.STAUDTE) 21 décembre 1971 voir colonne 3, ligne 55 - colonne 4, ligne 15; figures 1, 2 ---	8, 9
A	THIN SOLID FILMS. vol. 181, no. 1, 10 décembre 1989, LAUSANNE CH pages 235 - 243; ROGER T.HOWE: "Microsensor and microactuator applications of thin films" voir le document en entier ---	1-4, 13

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE
RELATIF A LA DEMANDE INTERNATIONALE NO.**

CH9100030

SA 43995

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche internationale visé ci-dessus.

Lesdits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du

Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets.

10/05/91

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
FR-A-1521852		BE-A- 697890	03-10-67
		CH-A- 484551	15-01-70
		DE-A- 1613330	08-04-71
		NL-A- 6605934	06-11-67
		US-A- 3436630	01-04-69

US-A-3629624	21-12-71	Aucun	

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☒ **BLACK BORDERS**
- ☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- ☐ **FADED TEXT OR DRAWING**
- ☐ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- ☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- ☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- ☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**
- ☐ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- ☐ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- ☐ **OTHER:** _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.